

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В статье представлены результаты исследований, направленных на создание метода параметрической идентификации линий электропередачи на основе фазных координат, позволяющего повысить точность определения потерь мощности.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, линии электропередачи, параметрическая идентификация.

Введение. Точность моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) определяется адекватностью используемых математических моделей и погрешностями исходных данных. Вектор исходных данных **D** включает две группы параметров: структурные **П** и режимные **У**, т. е. $D = П \cup У$. В состав вектора **П** входят параметры высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), трансформаторов, а также регулирующих и компенсирующих устройств. Вектор **У** образуют активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок. В современных ЭЭС компоненты вектора **У** определяются на основании телеизмерений с использованием хорошо разработанных методов оценивания состояния [1] и потому вопрос об адекватности этой группы параметров можно считать решенным. Параметры **П** определяются на основании аналитических выражений, представленных, например, в работе [2]. При этом могут возникнуть значительные погрешности, о чем свидетельствует табл. 1, заимствованная из работы [3].

Уточнение параметров и получение адекватной реальным условиям математической модели ЛЭП может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [3, 4]. Однако существующие методы идентификации параметров ЛЭП разработаны при-

менительно к однолинейным схемам замещения и потому неприменимы для расчета режимов при наличии продольной и поперечной несимметрии, которая особенно сильно проявляется в ЭЭС, питающих электротяговые нагрузки. В настоящей статье приведены результаты исследований, направленных на развитие метода параметрической идентификации ЛЭП, предложенного в работе [5] и основанного на использовании фазных координат.

Постановка задачи. Имеется ряд задач электроэнергетики, для решения которых требуется высокая точность задания параметров ЛЭП. Прежде всего это задачи определения потерь мощности и энергии в электрических сетях. В нормативных документах указывается, что значение потерь, выраженное в процентах, должно округляться таким образом, чтобы число содержало не более одного знака после запятой. Например, если относительная величина потерь для некоторой ЭЭС составляет 8,5 %, то для гарантированной точности первой значащей цифры после запятой погрешность определения потерь не должна превышать $0.1/8.5 \cdot 100 \% = 1.17 \%$.

Можно показать, что вследствие погрешностей, указанных в табл. 1, фактическая точность определения потерь мощности может быть значительно хуже требуемой.

Таблица 1

Погрешности определения параметров ЛЭП

Параметр	Причины возникновения погрешностей	Погрешность, %
Продольное активное сопротивление R	Неучет поверхностного эффекта. Неучет влияния погодных условий: температуры воздуха, ветра, наличия и интенсивности осадков	-20 ... +16 %

* - автор, с которым следует вести переписку.

Продолжение таблицы 1

Продольное реактивное сопротивление X	Неточности задания среднегеометрического расстояния между проводами и эквивалентного радиуса провода. Многократно заземленные тросы и параллельные цепи	-10 ... + 8 %
Поперечная емкостная проводимость B	Неучет изменения стрелы провеса и радиуса провода, наличия заземленного троса и параллельных цепей, неточное задание проводимости грунта	+25 ... 30 %
Поперечная активная проводимость G	Конструктивные, режимные и метеорологические условия	150 ... 200 %

Линии электропередачи представляют собой статические многопроводные элементы (СМЭ) из нескольких проводов, обладающих взаимной электромагнитной связью. В работе [5] показано, что для адекватного моделирования СМЭ в фазных координатах можно использовать решетчатые схемы замещения, математическое описание которых осуществляется с помощью матриц проводимости \underline{Y}_{PC} размерностью $m \times m$, определяемой числом проводов m . Элементы этих матриц определяются на основе собственных и взаимных сопротивлений проводов

$Z_i, Z_{ij}, i, j = 1..m$, а также емкостных проводимостей $y_{i0}, y_{ij}, i, j = 1..m$ между проводами и землей.

Трехпроводная ЛЭП, исходная модель которой представлена на рис. 1, допускает достаточно простое решение задачи параметрической идентификации.

Эта задача может быть решена следующим образом. Организуется измерение токов, протекающих по проводам, а также измерение напряжений провод-земля в начале и конце ЛЭП. Такие измерения требуют синхронизации измерительных действий в отдаленных друг от друга пунктах, что может быть реализовано на основе технологий PMU-WAMS, широко внедряемых в настоящее время в практику управления режимами ЭЭС [6]. Использование технологии векторной регистрации параметров режимов (Phasor measurement technology) является на современном этапе одним из главных приоритетов технологического развития ЭЭС. На базе этой технологии реализуются системы синхронизированных измерений (Wide Area Measurement Systems, WAMS), которые применяются для улучше-

ния информационной обеспеченности задач управления режимами ЭЭС. Особенностью WAMS является возможность синхронизации измерений режимных параметров с помощью космических аппаратов, обеспечивающих решение задач глобального позиционирования (GPS, Глонасс). В состав системы входят регистраторы, реализованные на основе многофункциональных измерительных приборов, подключаемых к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов тока и напряжения.

На основе результатов синхронизированных измерений токов и напряжений составляется система уравнений, из которой возможно определить элементы матрицы \underline{Y}_{PC} . На первый взгляд, возможно непосредственное определение этих элементов, например, из решения уравнений

$$\underline{Y}_{PC} = (\tilde{\underline{U}}_Z^T \dot{\underline{U}}_Z)^{-1} \tilde{\underline{U}}_Z^T \dot{\underline{I}}_Z,$$

где $\dot{\underline{U}}_Z, \dot{\underline{I}}_Z$ – измеренные с помощью устройств PMU-WAMS комплексы токов и напряжений на приемном и отправном концах ЛЭП. Теоретический анализ и результаты вычислительных экспериментов показали, что использование вышеуказанной процедуры для определения матрицы \underline{Y}_{PC} не представляется возможным из-за крайне плохой обусловленности матрицы $\tilde{\underline{U}}_Z^T \dot{\underline{U}}_Z$.

Если учесть геометрические параметры проводов, принятые к применению для определения взаимных емкостей, то можно существенно упростить процесс расчета параметров ЛЭП.

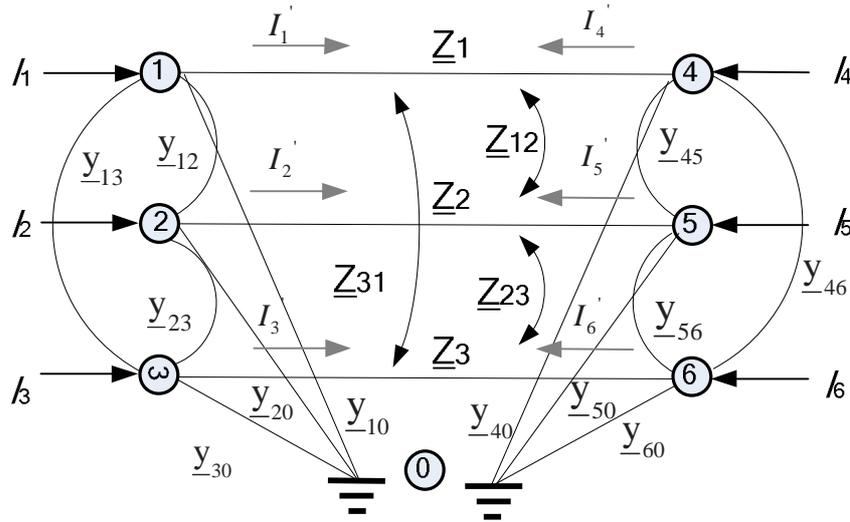


Рис. 1. Исходная модель ЛЭП в фазных координатах.

Внешнее сопротивление контура провод-земля вычисляется в соответствии со следующей формулой:

$$\underline{Z}_{out1} = 0.001f + jf \left[0.01148 - 0.001256 \ln(r \sqrt{0.02\gamma f}) \right],$$

где f – частота, Гц; r – эквивалентный радиус провода (для сталеалюминиевых проводов принимаемый равным 0,95 внешнего радиуса поперечного сечения провода), см; γ – удельная проводимость земли, См/м. Это соотношение можно переписать в следующем виде:

$$\underline{Z}_{out1} = \underline{Z}_{o1} - \underline{Z}_{g1},$$

где

$$\underline{Z}_{o1} = 0.001f + jf \left[0.01148 - 0.001256 \ln(r \sqrt{0.02f}) \right],$$

$$\underline{Z}_{g1} = jf 0.000628 \ln \gamma.$$

Внутреннее сопротивление различно для различных типов проводов. При сталеалюминиевых проводах используются аппроксимирующие зависимости:

$$R_{in1} = R_0 \left(0.9 + 0.0063 f^{0.755} \right);$$

$$X_{in1} = 0.00 \left[(0.033 - 0.00107 f^{0.83}) S + (1.07 f^{0.83} - 13.5) \right], \text{ дов:}$$

где R_0 – сопротивление 1 км провода постоянному току, Ом/км; S – площадь сечения провода, мм².

В сплошных алюминиевых и медных проводах цилиндрического сечения учитывается скин-эффект во внутреннем сопротивлении по

следующим приближенным формулам при условии $x \leq 4$:

$$R_{in1} = R_0 \left(1 + 0.0049 x^4 - 0.000035 x^7 \right),$$

Ом/км;

$$X_{in1} = R_0 \left(0.125 x^2 - 0.000613 x^5 \right), \text{ Ом/км,}$$

где $x = 0.01 r \sqrt{\frac{7896 f}{R_0 S}}$, r – радиус провода,

см; S – площадь сечения провода, мм². При больших значениях x используются соотношения

$$R_{in1} = X_{in1} = 0.3536 R_0 x.$$

Для стальных проводов может быть использовано приближенное выражение следующего вида:

$$R_{in1} = R_{50} \sqrt{0.02 f},$$

$$X_{in1} = 0.75 R_{in1},$$

в предположении задания в качестве входных данных активного сопротивления R_{50} для частоты 50 Гц.

Сопротивление петли провод-земля содержит неизвестное слагаемое \underline{Z}_{g1} , остальные слагаемые могут быть вычислены по известным с большой точностью параметрам проводов:

$$\underline{Z}_{w1} = \underline{Z}_{S1} - \underline{Z}_{g1};$$

$$\underline{Z}_{S1} = \underline{Z}_{o1} + R_{in1} + jX_{in1}.$$

Сопротивление взаимоиנדуктивной связи между парой проводов определяется по соотношению следующего вида, содержащему

вычисляемое слагаемое и тот же неизвестный член \underline{Z}_{g1} :

$$\underline{Z}_M = 0.001f + jf \left[0.005693 - 0.001256 \ln(d_{ik} \sqrt{0.02\gamma f}) \right];$$

$$\underline{Z}_M = \underline{Z}_{M1} - \underline{Z}_{g1};$$

$$\underline{Z}_{M1} = 0.001f + jf \left[0.005693 - 0.001256 \ln(d_{ik} \sqrt{0.02f}) \right],$$

где $d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ – расстояние между проводами i и k с координатами (x_i, y_i) , (x_k, y_k) , м.

Ввиду наличия всего одного неизвестного \underline{Z}_{g1} можно перевести в разряд определяемых по параметрам режима и внутреннее сопротивление

$$\underline{Z}_{in} = (R_{in1} + jX_{in1})l.$$

Таким образом, сопротивления системы проводов равны:

$$\underline{z}_1 = (\underline{Z}_{S1} - \underline{Z}_{g1})l = \underline{Z}_{o1}l + \underline{Z}_{in} - \underline{Z}_g;$$

$$\underline{z}_{12} = \underline{Z}_{M12}l - \underline{Z}_g;$$

$$\underline{Z}_g = \underline{Z}_{g1}l;$$

$$\underline{z}_{13} = \underline{Z}_{M13}l - \underline{Z}_g;$$

$$\underline{z}_{23} = \underline{Z}_{M23}l - \underline{Z}_g;$$

$$\underline{Z}_{o1} = 0.001f + jf \left[0.01148 - 0.001256 \ln(r \sqrt{0.02f}) \right];$$

$$\underline{Z}_{Mik} = 0.001f + jf \left[0.005693 - 0.001256 \ln(d_{ik} \sqrt{0.02f}) \right],$$

$i, k=1..3.$

Уравнения для падений напряжений за счет индуктивных элементов принимают вид:

$$\underline{Z}_{in} \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_g (\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e} \dot{U}_{41} =$$

$$= \dot{U}_{11} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M12} l \dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M13} l \dot{I}_{31}';$$

$$\underline{Z}_{in} \dot{I}_{21}' - \underline{Z}_g (\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e} \dot{U}_{51} =$$

$$= \dot{U}_{21} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M12} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23} l \dot{I}_{31}';$$

$$\underline{Z}_{in} \dot{I}_{31}' - \underline{Z}_g (\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') + \dot{e} \dot{U}_{61} =$$

$$= \dot{U}_{31} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{31}' - \underline{Z}_{M13} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23} l \dot{I}_{21}';$$

где $\dot{e} = e^{j\Psi}$ – дополнительная переменная, корректирующая сдвиг фаз между напряжениями и токами начала и конца линии.

В матричной форме последняя система принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{11}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{41} \\ \dot{I}_{21}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{51} \\ \dot{I}_{31}' & -(\dot{I}_{11}' + \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{31}') & \dot{U}_{61} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{in} \\ \underline{Z}_g \\ \dot{e} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M12} l \dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M13} l \dot{I}_{31}' \\ \dot{U}_{21} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{21}' - \underline{Z}_{M12} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23} l \dot{I}_{31}' \\ \dot{U}_{31} - \underline{Z}_{o1} l \dot{I}_{31}' - \underline{Z}_{M13} l \dot{I}_{11}' - \underline{Z}_{M23} l \dot{I}_{21}' \end{bmatrix}$$

Из ее решения могут быть найдены неизвестные параметры \underline{Z}_{in} , \underline{Z}_g , \dot{e} .

Результаты моделирования. Анализ выполнен применительно к схеме магистральной ЛЭП, расчетная схема которой показана на рис. 2. Участок состоит из трех воздушных линий, выполненных проводом АС-240, с длинами 50, 100 и 50 км.

Для данной сети выполнена серия расчетов установившихся режимов при различных нагрузках на приемном конце линии электропередачи при двух вариантах задания параметров П. В первом (базовом) варианте заданы параметры, объявленные точными. Во втором варианте внесены погрешности, лежащие в пределах, указанных в табл. 1, в следующие исходные данные: длину ЛЭП, высоту подвеса, геометрию расположения проводов. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и проиллюстрированы графиками, приведенными на рис. 3. Полученные результаты показывают, что вследствие незначительных и весьма вероятных на практике ошибок в задании длины ЛЭП (7,4 %), высоте подвеса проводов (7,1 %) и неточностей в геометрии их расположения погрешность определения потерь может достигать 40 % для отдельной ЛЭП и 38 % в целом для сети.

Далее были выполнены расчеты с использованием методов параметрической идентификации. Расчетная схема, реализованная на основе описанного выше алгоритма, представлена на рис. 4. Расчеты выполнены с помощью комплекса программ «Fazonord-Качество», разработанного в ИрГУПСе [7, 8].

Результаты расчетов показаны на рис. 5. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что на основе параметрической идентификации в фазных координатах можно получить приемлемую для практических целей точность определения потерь мощности и энергии. При этом величина погрешности в определении потерь мощности не превышает 4 %.

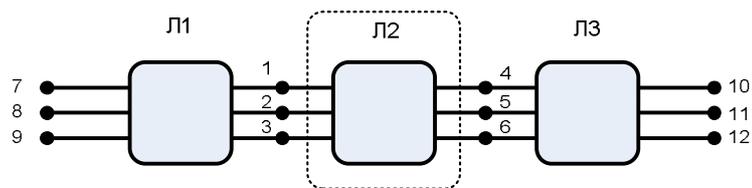


Рис. 2. Расчетная схема:
пунктирной рамкой выделена ЛЭП, параметры которой определяются на основе идентификации.

.Таблица 2

Погрешности определения потерь активной мощности

$S, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	Расчет на основе идентификации		Расчет по данным, имеющим погрешности	
	Для Л2	Для сети в целом	Для Л2	Для сети в целом
0	1,48	0,67	13,09	9,43
3,75	2,53	3,78	10,94	5,19
7,5	0,72	0,27	7,10	3,97
11,25	1,66	0,79	7,09	3,67
15,0	2,08	0,99	7,50	3,98
18,75	2,12	1,09	8,01	4,47
22,5	2,26	1,15	8,55	5,01
26,25	2,34	1,21	9,62	6,10
30,0	2,40	1,27	10,95	7,52
33,75	2,51	1,38	13,83	10,47
37,5	2,15	1,06	27,48	24,62
41,25	2,82	1,71	40,17	37,82

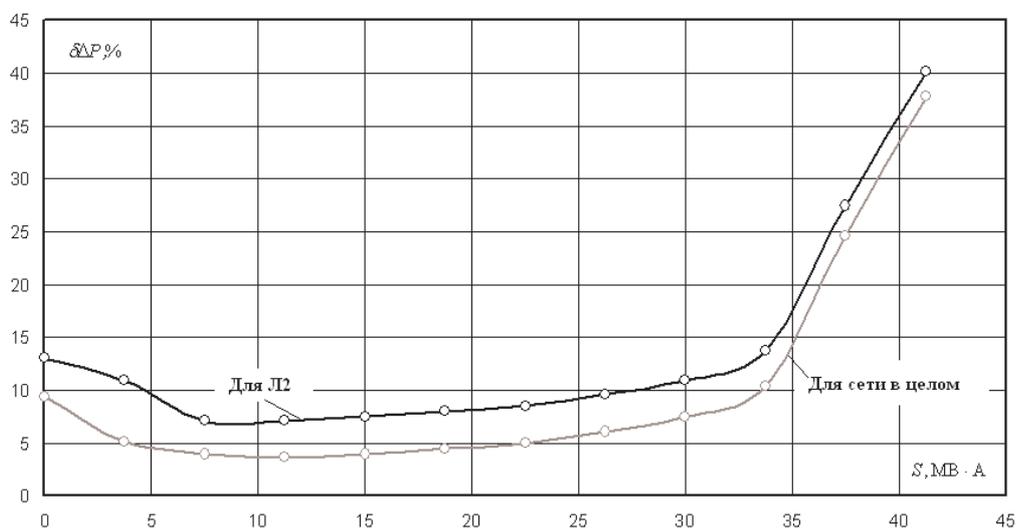


Рис. 3. Изменение погрешности определения потерь активной мощности с ростом нагрузки сети при использовании информации, имеющей погрешности.

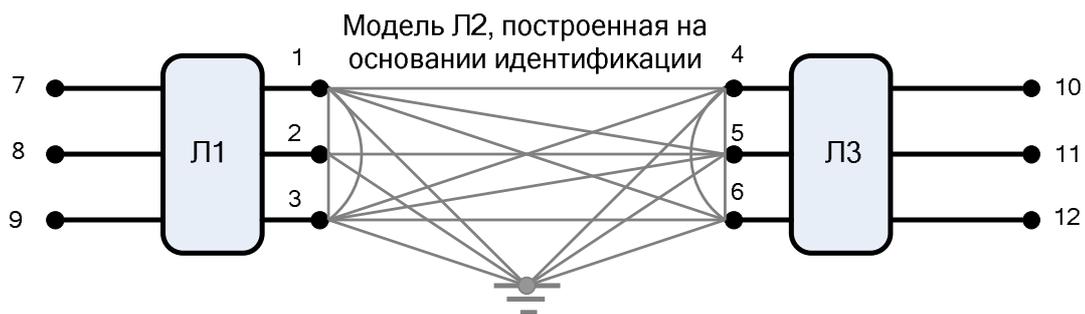


Рис. 4. Расчетная схема сети, построенная на основе идентификации: серыми линиями показаны проводимости решетчатой схемы.

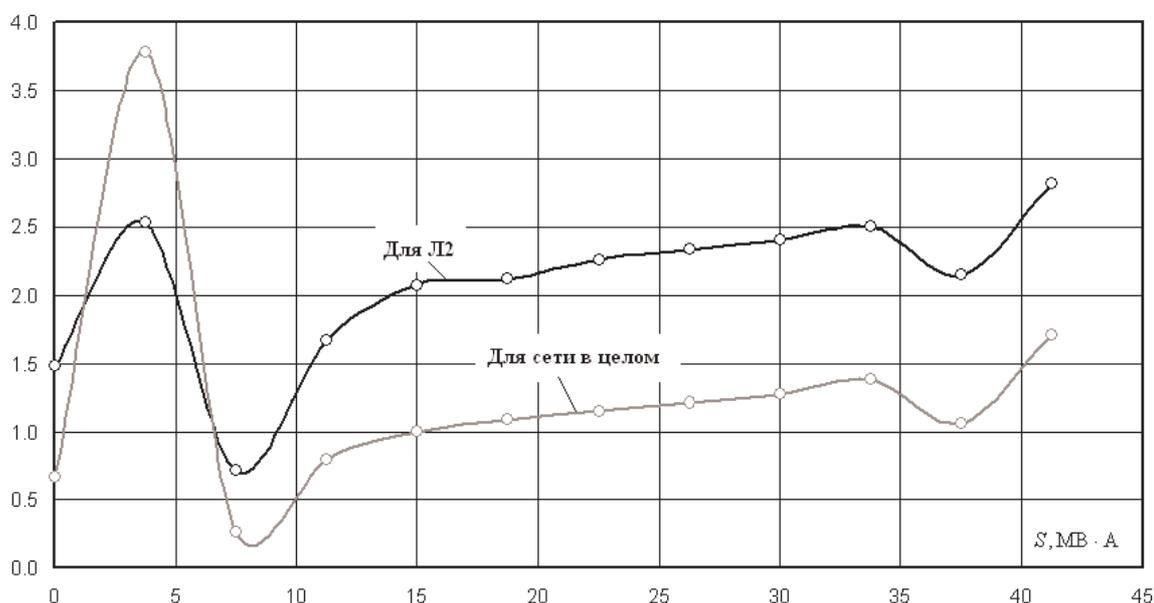


Рис. 5. Изменение погрешности определения потерь активной мощности с ростом нагрузки сети при использовании результатов параметрической идентификации.

Выводы

1. При решении задач расчета потерь мощности и энергии могут возникать существенные погрешности, связанные с вероятными на практике ошибками в задании параметров линий электропередачи высокого напряжения. Расчеты показали, что величина ошибки в определении потерь мощности может достигать недопустимой величины в 40 %.

2. Эффективный способ повышения точности расчета потерь мощности и энергии состоит в использовании метода параметрической идентификации, основанного на использовании фазных координат и аналитических выражений для расчета ряда импедансов многопроводной системы. При этом мак-

симальная погрешность в определении потерь мощности не превышает 4 %.

Литература

1. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Шелюг С.Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети: автореф. дисс. канд. техн. Екатеринбург: УГТУ(УПИ), 2000. 23 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.:

Наука, 1987. 712 с.

5. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложно-несимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

6. Шульгин М.С., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1(29), 2011.

7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложно-

несимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

8. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В.П., Крюков А.В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

УДК 28.29

Ю.Н. Алпатов*, С.Б. Бурнашова

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ»

Настоящая статья посвящена разработке топологической модели учебного процесса по изучению дисциплины «Информационная безопасность и защита информации». Для разработки модели проведен детальный анализ процесса проектирования основной образовательной программы (ООП) и процесса реализации ООП по направлению подготовки. Определены параметры процесса и построена топологическая модель процесса изучения дисциплины «Информационная безопасность и защита информации» в виде структурной схемы и С-графа.

Ключевые слова: топологическая модель, основная образовательная программа, учебный процесс, структурная схема, структурный граф.

В настоящее время в России большое внимание уделяется реструктуризации высшей школы. После присоединения России к Болонскому процессу в сентябре 2003 года все положения Декларации, включая Положение об использовании в национальных системах образования «однозначно воспринимаемых и сопоставимых квалификаций», приняли для нас характер международных обязательств, подлежащих исполнению. На основании этого в последние годы в России активно проводится изменение законодательной и нормативной базы высшего образования.

Повышение качества образования является приоритетным направлением в управленческой деятельности администрации высших учебных заведений.

Качество образования – это совокупность существенных свойств образования, соответствующая современным требованиям педагогиче-

ской теории, практики и способная удовлетворить образовательные потребности личности, общества и государства. Для повышения качества образования необходимо разработать методики управления качеством. Разработка таких методик сопряжена с трудностями их внедрения и проверки на реальном процессе. В работе мы предлагаем метод исследования характеристик учебного процесса на основе получения топологической модели.

В настоящее время широкое применение к исследованию деятельности системы высшей школы получил процессный подход, в частности в оценке качества обучения. В работе рассмотрены основные и вспомогательные виды деятельности, реализуемые в высшей школе. Выделяя образовательный процесс как основу технологического процесса вуза, применим к изучению этого процесса системный подход и рассмотрим его более подробно в области ос-

* - автор, с которым следует вести переписку.