

ЭФФЕКТИВНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Долбин К.С.

Студент 3 курса энергетического института СПбПУ (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) kirill.dolbin.02@mail.ru

Аннотация. При проектировании и эксплуатации энергетической системы (ЭС) стоит задача оптимизировать ее режим работы. Основные критерии оптимизации экономические: удешевление производства и передачи электроэнергии потребителю. Немало важным фактором является оптимизация потоков мощности и уменьшение потерь в сети. Решение этой задачи достигается путем изменения параметров ЭС (сопротивлений линии, коэффициентов трансформации и т. д.). То есть задача состоит в подборе таких параметров, чтобы характеристики ЭС (токи, напряжения, мощности и т. д.) были оптимальны. Появляется необходимость высокоточной методики определения изменения характеристик системы от изменения ее параметров. Таким способом является получение функциональной зависимости между изменяемым параметром и рассматриваемой характеристикой. Такое соотношение позволит получить оптимальные параметры ЭС без дополнительных расчетов режима. В настоящей статье предлагается аппроксимация дробно полиномиальной функцией, так как соотношение параметров и характеристик электрической цепи описывается данным соотношением. В статье представлена методика определения характеристик сети посредством билинейной теоремы (БТ). А также возможность использования полученных соотношений для анализа работы ЭС.

Ключевые слова: энергетическая система; билинейная теорема; оптимизация режима работы; функциональная зависимость.

ЭНЕРГЕТИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРДЫН СТАТИКАЛЫК РЕЖИМДЕРИН ОПТИМАЛДАШТЫРУУ ҮЧҮН АГЫМДАРДЫН, ЧЫҢАЛУУЛАРДЫН ЖАНА КҮЧТӨРДҮН ЭФФЕКТИВДҮҮ ЖАКЫНДООСУ

Долбин К.С.

СПбПУнун энергетика институтунун 3-курсунун студенти (Улуу Петр Петербург политехникалык университети) kirill.dolbin.02@mail.ru

Аннотация. Энергетикалык системаны (ЭС) долбоорлоодо жана эксплуатациялоодо анын иштөө режимин оптималдаштыруу милдети турат. Негизги оптималдаштыруу критерийлери экономикалык: арзан өндүрүү жана керектөөчүгө электр энергиясын берүү. Электр агымдарын оптималдаштыруу жана тармактагы жоготууларды азайтуу маанилүү фактор болуп саналат. Бул маселени чечүү ЭСтин параметрлерин өзгөртүү жолу менен ишке ашат (сызыктын каршылыгы, трансформация коэффициенттери ж. б.). Башкача айтканда, милдет ЭСтин мүнөздөмөлөрү (ток, чыңалуу, кубаттуулук ж.б.) оптималдуу болушу үчүн ушундай параметрлерди тандоодо турат. Анын параметрлеринин өзгөрүшүнө байланыштуу системанын мүнөздөмөлөрүнүн өзгөрүшүн аныктоо үчүн жогорку тактык методу зарыл. Бул жол өзгөрмө параметр менен каралып жаткан мүнөздөмөнүн ортосундагы функционалдык байланышты алуу болуп саналат. Бул катыш режимди кошумча эсептөөлөрсүз эле ЭСтин оптималдуу параметрлерин алууга мүмкүндүк берет. Бул макалада электр чынжырынын параметрлеринин жана мүнөздөмөлөрүнүн катышы ушул

катыш менен сүрөттөлгөндүктөн, бөлүкчөлүү көп мүчөлүү функция менен жакындатуу сунушталат. Макалада билинардык теорема (БТ) аркылуу тармактын мүнөздөмөлөрүн аныктоо ыкмасы берилген. Ошондой эле ЭСтин ишин талдоо үчүн алынган байланыштарды колдонуу мүмкүнчүлүгү.

Негизги сөздөр: энергетикалык система; эки сызыктуу теорема; иштөө режимин оптималдаштыруу; функционалдык көз карандылык.

EFFICIENT APPROXIMATION OF CURRENTS, VOLTAGES AND POWERS TO OPTIMIZE THE STATIC MODES OF POWER SYSTEMS

Dolbin K.S.

3rd year student of the Energy Institute of SPbPU (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University) kirill.dolbin.02@mail.ru

Annotation. When designing and operating a power system (ES), the task is to optimize its mode of operation. The main optimization criteria are economic: cheaper production and transmission of electricity to the consumer. An important factor is the optimization of power flows and reduction of losses in the network. The solution to this problem is achieved by changing the parameters of the ES (line resistance, transformation ratios, etc.). That is, the task is to select such parameters so that the characteristics of the ES (currents, voltages, powers, etc.) are optimal. There is a need for a high-precision method for determining the change in the characteristics of the system due to changes in its parameters. This way is to obtain a functional relationship between the variable parameter and the characteristic under consideration. This ratio will allow obtaining the optimal parameters of the ES without additional calculations of the mode. This article proposes an approximation by a fractional polynomial function, since the ratio of the parameters and characteristics of the electric circuit is described by this ratio. The article presents a technique for determining the characteristics of a network by means of a bilinear theorem (BT). As well as the possibility of using the obtained relationships to analyze the operation of the ES.

Key words: energy system; bilinear theorem; optimization of the operating mode; functional dependency.

Введение. В проектировании ЭС существует задача снижения потерь мощности и перераспределение реактивной мощности между ее источниками [1]. Помимо этого, параметры сети и, как следствие, характеристики изменяются при применении средств реактивной компенсации, в качестве борьбы с такими явлениями, как эффект Ферранти [2]. Это задача имеет множество методов решения, в том числе перекликающимися с вышеописанными пунктами. По средствам регулировки параметров ЭС выделяют три основных метода оптимизации: регулировка уровня рабочего напряжения, снижение влияния неоднородности замкнутых сетей, оптимизация распределения реактивной мощности между ее источниками [3]. Задача состоит в подборе параметров энергетической системы таким образом, чтобы потери мощности были минимальны [4-7]. Существуют различные программы, позволяющие рассчитать установившийся режим по заданным параметрам сети, однако в них не реализована методика регулирования параметров модели, что не позволяет в должной мере произвести оптимизацию режима. Данный процесс можно упростить, если получить соотношение между регулируемым параметром и характеристикой сети. Решение такой задачи

сводится не к пересчету режимов с различными значениями параметров, а к решению системы линейных уравнений для получения аппроксимирующей функции [8]. Такое функциональное соотношение позволит определить наиболее подходящие параметры сети с минимальными затратами времени.

Цели и задачи

Основной целью является получение аппроксимирующей функции связывающей характеристики ЭС и регулируемые параметры сети.

Поставленные задачи:

- определить зависимость токов, напряжений и мощностей от изменения индуктивного сопротивления линии;
- определить зависимость потерь активной мощности от изменения индуктивного сопротивления линии;

Постановка задачи

При анализе ЭС существует ряд факторов, отличающих задачу от электрической цепи. Сама задача является нелинейной, при этом различные элементы системы такие, как трансформаторы, регуляторы и т. п., значительно усложняют расчет. В качестве ЭС

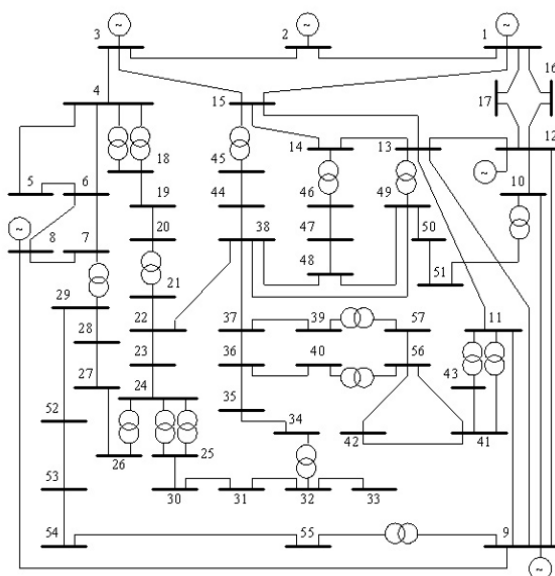


Рисунок 1. Схема ЭС

была рассмотрена схема IEEE-57.

Регулируемыми параметрами были выбраны индуктивные сопротивления линий. Изменение индуктивного сопротивления линии влияет на потери мощности в сети. Коэффициент трансформации влияет на однородность замкнутой ЭС, что также влечет изменение потерь мощность в сети [3]. Для учета влияния остальных параметров ЭС были выбраны следующие ветви. В качестве изменяемых ветвей (ветвей, в которых изменялось индуктивное сопротивление): 22 – 23; 17 – 12; 51 – 50. Соответственно им рассматриваемые ветви (ветви, в которых отслеживалось изменение характеристик):

22–21; 17–1; 10–51 ;
 20–21; 12–10; 12–10;
 20–19; 10–51; 17–12;
 23–24; 51–50; 17–1;
 22–38;
 38–48.

Такой выбор ветвей позволяет рассмотреть факторы близости генерации и положение относительно трансформаторов к рассматриваемым и изменяемым ветвям схемы.

Решение поставленной задачи

В линейной электрической цепи посредством БТ можно определить зависимости токов и напряжений от сопротивлений с весьма высокой точностью [9]. Как было отмечено ранее, в случае анализа ЭС задача является нелинейной, однако нелинейную задачу можно линеаризовать посредством комплексного представления величин [10]. В таком случае билинейная функция не изменит общего вида, но ее коэффициенты станут комплексными числами. Функция напряжения в произвольном узле в зависимости от изменения произвольного сопротивления линии:

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{a}_{U_n} + \dot{b}_{U_n} jx}{1 + \dot{c}_{U_n} jx} \quad (1)$$

Где n – номер узла; x – индуктивное сопротивление изменяемой ветви; $\dot{a}_{U_n}, \dot{b}_{U_n}, \dot{c}_{U_n}$ – неизвестные коэффициенты аппроксимирующей функции.

Для определения констант проводится расчет режима по трем значениям изменяемого параметра, в результате чего получается система с тремя неизвестными комплексными коэффициентами.

$$\dot{U}_{nm} = \frac{\dot{a}_U + \dot{b}_U jx_m}{1 + \dot{c}_U jx_m}; m = \overline{1,3} \quad (2)$$

Где x_m – индуктивное сопротивление линии; \dot{U}_{nm} – значение напряжения в n -ном узле, полученное экспериментально при заданном x_m .

В случае определения токов в ЭС выделяются ток начала и конца линии, поэтому для определения токов используются две системы, составленные аналогично:

$$\dot{I}_{nm} = \frac{\dot{a}_{I_n} + \dot{b}_{I_n} jx_m}{1 + \dot{c}_{I_n} jx_m}; m = \overline{1,3} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{km} = \frac{\dot{a}_{I_k} + \dot{b}_{I_k} jx_m}{1 + \dot{c}_{I_k} jx_m}; m = \overline{1,3} \quad (4)$$

Где x_m – индуктивное сопротивление линии; i_{nm}, i_{km} – значения тока начала и конца ветви $n-k$, соответственно, полученные экспериментально при заданном x_m .

Решив системы (2)-(4), получим функциональные зависимости для токов и напряжений соответствующих ветвей и узлов.

Ниже приведены графики зависимости токов и напряжений от индуктивного сопротивления, полученные с помощью БТ и с помощью расчета режима. Также приведена относительная погрешность между результатами методов.

Приведем характерный график. Для рассмотрения остальных ветвей составим таблицу, где средняя относительная погрешность приведена в зависимости от метрики графа (L). На графиках видно, что значения напряжения, полученные

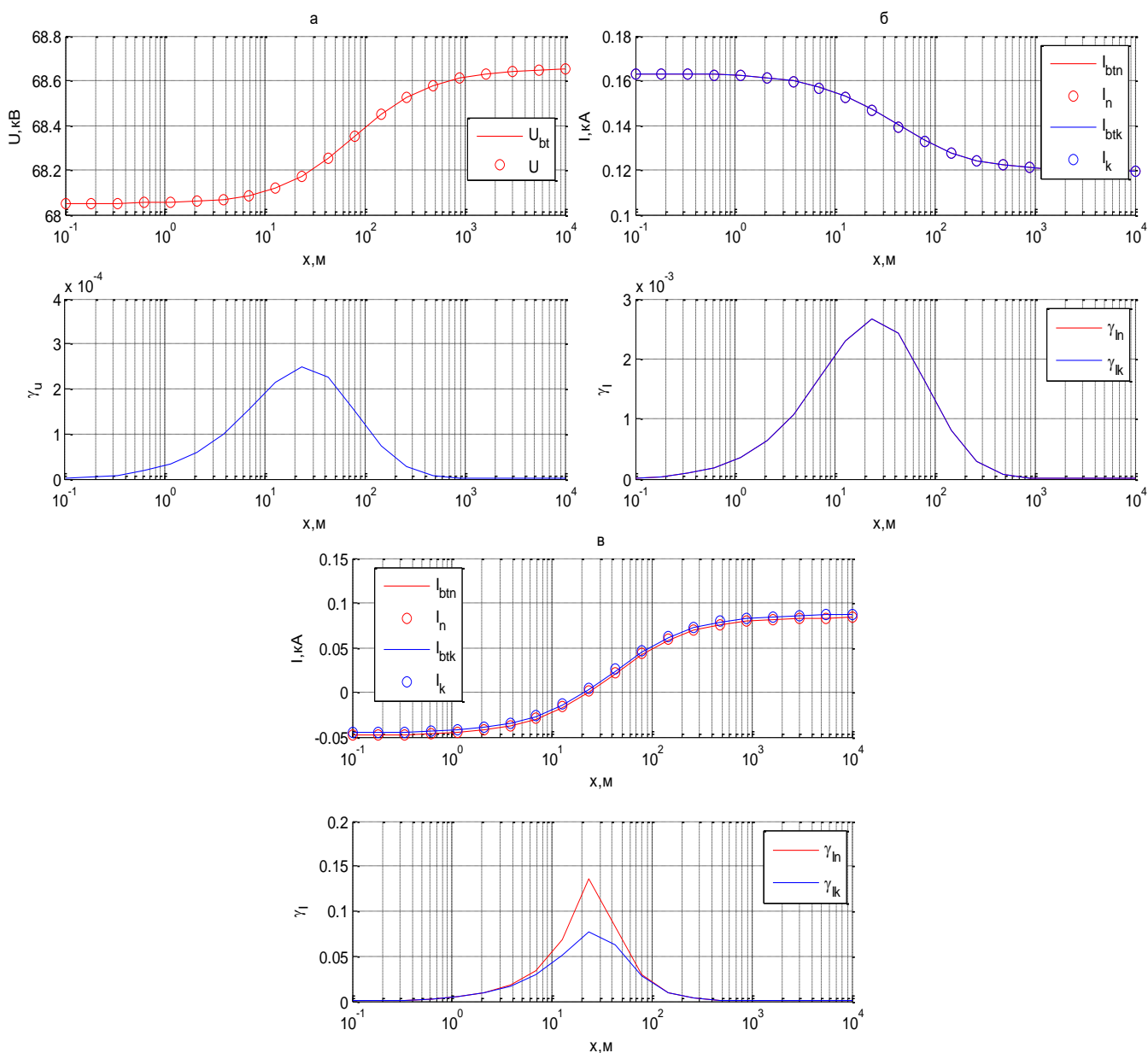


Рисунок 2. Зависимости модулей напряжений (а), токов начала и конца ветви (б), токов начала и конца трансформатора (в) и относительной погрешности их определения от индуктивного сопротивления в ветви 22–23

экспериментально и с помощью БТ, сходятся с относительной погрешностью порядка 10^{-4} (а). Значения токов в ветвях сходятся с относительной погрешностью порядка 10^{-3} (б). Отметим также, что значения токов начала и конца равны между собой. Для трансформатора ток начала и конца, а также относительная погрешность их определения, имеют небольшое отличие (в). Относительная погрешность для такой ветви имеет выбросы, однако на среднем значении это не отражается, что показано в таблице 2.

Таблица 1. Зависимость средней относительной погрешности определения напряжений от метрики графа при изменении индуктивного сопротивления.

Изменяемая ветвь								
22–23			17–12			51–50		
L	Узел	$\gamma_U, 10^4$	L	Узел	$\gamma_U, 10^4$	L	Узел	$\gamma_U, 10^4$
0	22	0.66	0	17	15.10	1	10	0.65
1	21	0.65	1	1	0	0	51	0.34
2	20	0.48	0	12	6.54	2	12	0.88
3	19	0.43	1	10	5.56	3	17	0.33
0	23	3.45	2	51	5.40	4	1	0
1	24	2.48	3	50	4.68	–	–	–
1	38	0.53	–	–	–	–	–	–
2	48	0.46	–	–	–	–	–	–

Таблица 2. Зависимость средней относительной погрешности определения токов от метрики графа при изменении индуктивного сопротивления.

Изменяемая ветвь											
22–23				17–12				51–50			
L	Ветвь	$\gamma_{I_n}, 10^3$	$\gamma_{I_k}, 10^3$	L	Ветвь	$\gamma_{I_n}, 10^3$	$\gamma_{I_k}, 10^3$	L	Ветвь	$\gamma_{I_n}, 10^3$	$\gamma_{I_k}, 10^3$
0	21–22	1.65	1.65	0	1–17	14.31	14.31	0	10–51	1.51	1.51
1	21–20	1.63	1.63	0	10–12	3.31	3.54	1	10–12	1.19	1.30
2	19–20	1.24	1.24	1	10–51	1.39	1.39	2	12–17	0.62	0.61
0	23–24	19.98	14.75	2	50–51	2.69	2.69	3	1–17	0.34	0.34
0	22–38	5.43	5.43	–	–	–	–	–	–	–	–
1	38–48	0.71	0.71	–	–	–	–	–	–	–	–

При анализе ЭС рассматривается мощность, протекающая в ветви. Запишем выражение для определения полной мощности посредством билинейной теоремы. ($\hat{\cdot}$ – обозначение комплексно-сопряжённого числа)

$$\dot{S} = \dot{U}\hat{I} = \frac{\dot{a}_U + \dot{b}_U jx}{1 + \dot{c}_U jx} \cdot \left(\frac{\dot{a}_I + \dot{b}_I jx}{1 + \dot{c}_I jx} \right) = \frac{\dot{a}_U \hat{a}_I + (\dot{a}_U \dot{b}_I + \dot{b}_U \hat{a}_I) jx - \dot{b}_U \dot{b}_I x^2}{1 + 2\dot{c}' jx - (c'^2 + c''^2)x^2} \quad (5)$$

В преобразовании принято, что $\dot{c}_U = \dot{c}_I = \dot{c} = c' + jc''$ так как знаменатель – это определитель матрицы проводимостей, и он не зависит от рассматриваемой характеристики или параметра ЭС [9], следовательно знаменатели обеих дробей одинаковы, а так как выражение для тока берется комплексно-сопряженным получим равенство (5).

Преобразуя константы выражения (5), получим функцию (6):

$$\dot{S} = \frac{\dot{a}_S + \dot{b}_S jx - \dot{c}_S x^2}{1 + \dot{d}_S jx - \dot{e}_S x^2} \quad (6)$$

Где x – индуктивное сопротивление изменяемой ветви; $\dot{a}_S, \dot{b}_S, \dot{c}_S, \dot{d}_S, \dot{e}_S$ – неизвестные коэффициенты аппроксимирующей функции.

Чтобы определить выражение для мощности необходимо решить систему из пяти уравнений (7), (8). При этом выражения в начале и конце ветви будут отличаться. Для определения мощности начала возьмем напряжение в начальном узле и ток начала ветви, для мощности конца соответственно те же характеристики конца ветви.

$$\dot{S}_{nm} = \frac{\dot{a}_{S_n} + \dot{b}_{S_n} jx_m - \dot{c}_{S_n} x_m^2}{1 + \dot{d}_{S_n} jx_m - \dot{e}_{S_n} x_m^2}; m = \overline{1,5} \quad (7)$$

$$\dot{S}_{km} = \frac{\dot{a}_{S_k} + \dot{b}_{S_k} jx_m - \dot{c}_{S_k} x_m^2}{1 + \dot{d}_{S_k} jx_m - \dot{e}_{S_k} x_m^2}; m = \overline{1,5} \quad (8)$$

Где x_m – индуктивное сопротивление линии; $\dot{S}_{nm}, \dot{S}_{km}$ – значения тока начала и конца ветви $n-k$, соответственно, полученные экспериментально при заданном x_m .

Ниже приведены графики зависимости модулей полной мощности от индуктивного сопротивления, полученные с помощью БТ и с помощью расчета режима. Также приведена относительная погрешность между результатами методов.

Задача ЭС транспортировать как можно больше мощности, поэтому потери мощности в самой ЭС отрицательный фактор. Подобрал с помощью средств реактивной компенсации значение индуктивного сопротивления линии, можно уменьшить потери в сети. Согласно теории, выражение для потери активной мощности в линии:

$$\Delta P = \operatorname{Re}(\Delta \dot{S}) = \operatorname{Re}(\dot{S}_n - \dot{S}_k) \quad (8)$$

Интерес представляет зависимость суммарных потерь в линии. Для их получения сложим потери в каждой ветви в зависимости от изменяемого параметра. Построим график зависимости.

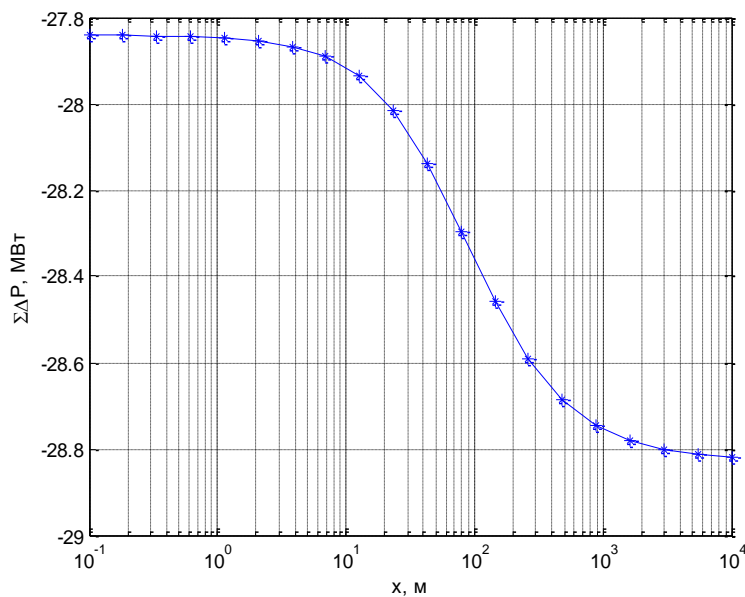


Рисунок 4 Зависимость суммарных потерь активной мощности в сети от индуктивного сопротивления в ветви 22–23

Выводы. В работе были получены соотношения посредством БТ между характеристиками режима и индуктивным сопротивлением произвольной линии, которые без расчета режима позволяют определить оптимальное значение параметров ЭС. Такой подход значительно облегчает анализ и проектирование ЭС.

Было показано, что средняя относительная погрешность определения характеристик ниже точности задаваемых параметров модели ЭС.

Приведена зависимость средней относительной погрешности от метрики графа, показывающая независимость точности соотношений от данного параметра.

При рассмотрении влияния структурных элементов ЭС (близость генерации и положение относительно трансформаторов) было выявлено лишь незначительное снижение средней точности определения характеристик. Экстремумы графиков можно характеризовать как плохую обусловленность задачи при конкретных значениях индуктивного сопротивления [11].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. *Application of multiobjective optimization methods for power system state control / Korovkin N. V., Odintsov M. V., Akimov D. A., Frolov O. V./ Recent Advances in Energy, Environment and Materials.*
2. *Техника высоких напряжений. Высоковольтные испытания и измерения: учебное пособие для вузов по направлению подготовки бакалавров "Техническая физика"/ Бочаров Ю. Н.; Дудкин С. М.; Титков В. В./ Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013*
3. *Электрические системы и сети: Учебник для вузов. / Идельчик В. И./ Москва: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.*
4. *Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем / Беляев Н. А., Коровкин Н. В., Фролов О. В., Чудный В. С.// Электротехника. – 2013. – № 2. – С. 21-28. – EDN PMSMOD.*
5. *Применение билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощности в энергосистемах, электротехнических комплексах и системах управления/ Беляев Н. А., Коровкин Н. В., Фролов О. В., Чудный В. С./ Электротехнические комплексы и системы управления, 2012, №1, с. 77-80.*
6. *Mathematical description of the influence of controlled network devices on the mode of electric power systems/ Belyaev N. A., Korovkin N. V., Chudny V. S. / Electricity, 2014, no.2, pp. 18-24.*
7. *Clustering of electric network for effective management of Smart grid / Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudny V.S./ IEEE International Symposium on Industrial Electronics [ISIE]// Stambul, 2014, pp. 1987 – 1990, DOI 10.1109/ISIE.2014.6864921.*
8. *Новый подход к исследованию режимов работы энергосистем / Н. В. Коровкин, О. В. Фролов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 6. – С. 39-47. – EDN PJCMUL.*
9. *Теория чувствительности и допусков электронных цепей / Гехер К. / Сов.радио, 1973, с. 200.*
10. *Теоретические основы электротехники. / Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л./ 1, с. 512.*
11. *Вычислительные методы линейной алгебры/ Фадеев Д.К., Фадеева В.Н./ Лань, 2002, с.736.*

Рецензент: Коровкин Николай Владимирович, Профессор, заведующий кафедрой Теоретических основ электротехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, nikolay.korovkin@gmail.com