

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕТОКА МОЩНОСТИ ПО ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕ С УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА КАСКАДНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Научная статья

Афанасьев А.П.^{1,*}¹ Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (preseptor[at]gmail.com)

Аннотация

Рассматривается электропередача, содержащая устройства компенсации, отбора мощностей P и Q , и имеющая источники реактивной мощности (ИРМ), подключаемые в отдельных узлах ВЛ. Для расчета режима электропередачи отдельные участки линии вместе с компенсирующими устройствами рассматриваются как четырехполюсники с распределенными параметрами [1], [5].

Предлагаемый алгоритм расчета основывается на теории каскадного соединения четырехполюсников, позволяющей эффективно учитывать любые изменения параметров линии электропередачи и изменения начальных условий. В отличие от традиционных методов, к которым относятся, методы контурных уравнений и уравнений узловых напряжений предлагаемый подход позволяет найти величину перетока мощности в любой произвольной точке электропередачи. Также стоит отметить низкую требовательность рассматриваемого подхода к вычислительным ресурсам.

Ключевые слова: линия электропередачи, компенсирующие устройства, схема замещения, распределенные параметры, четырехполюсник.

DETERMINATION OF POWER FLOW OVER A TRANSMISSION LINE WITH ARBITRARY POINT COMPENSATION DEVICES USING THE FOUR-POLE CIRCUIT TANDEM CONNECTION

Research article

Afanasyev A.P.^{1,*}¹ Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russian Federation

* Corresponding author (preseptor[at]gmail.com)

Abstract

A power transmission line is examined, containing compensation devices, P and Q power extraction devices and reactive power sources (RPS) connected at separate nodes of the line. To calculate the transmission mode, the individual line sections together with the compensating devices are regarded as four-pole circuits with distributed parameters [1], [5].

The suggested calculation algorithm is based on the theory of tandem connection of four-pole circuits, which allows to effectively account for any changes in power line parameters and in the initial conditions. In contrast to traditional methods, which include the methods of contour equations and node voltage equations, the proposed approach makes it possible to find the value of power flow in any arbitrary point of the transmission line. The low computational resource requirement of the considered approach should also be noted.

Keywords: transmission line, compensating devices, equivalent circuit, distributed parameters, four-pole circuit.

Введение

Электроэнергетические системы являются самыми масштабными искусственными объектами, сделанными людьми. Для эффективного функционирования таких систем и адекватной реакции на возникающие аварийные угрозы необходимо полное понимание физических процессов протекающих в этих системах и достоверная оценка параметров в любой точке и любой момент времени.

Кроме своей масштабности, электроэнергетические системы являются комплексными структурами с многослойным иерархическим строением.

На больших расстояниях, что характерно для Восточно-Сибирских и Дальневосточного регионов, передача электроэнергии осуществляется, как правило, с помощью воздушных линий (ВЛ) электропередач.

Чем на большее расстояние необходимо передать электроэнергию, тем больше напряжение требуется для лучшей эффективности энергопередачи. Для поддержания напряжения в заданных пределах, определяемых рамками руководящих документов, служат дополнительные устройства, в частности к этим устройствам относятся источники реактивной мощности (ИРМ) обеспечивающие эту задачу.

Для масштабных электропередач, соединяющих удаленные регионы, возникает задача определения параметров режима не только в выделенных узлах, но и в произвольных сечениях [2]. Существующие методы расчета параметров энергосистемы основаны на методах, представляющих электропередачу как систему с сосредоточенными параметрами, что справедливо для систем с небольшой протяженностью (до 300 км). Большие длины передач переменного тока приводят к необходимости учета волнового характера процессов, происходящих при передаче электрической энергии. Поскольку на частоте 50 Гц длина электромагнитной полуволны (сдвиг по фазе на 180°) в ВЛ составляет 3000 км, то при длинах свыше 300 км представление линий электропередач в виде четырехполюсника с сосредоточенными параметрами приводит не только к большой погрешности расчетов, но и к качественно неверным выводам [1], [10]. Анализ и расчеты режимов ДЭП должны выполняться с учетом распределенности параметров вдоль линии.

Рассмотрим компенсированную электропередачу, для которой принимаются следующие условия:

а) схему электропередачи (рисунок 1) моделируют в виде каскада n четырехполюсников (рисунок 2), представляющих участки линии электропередачи с распределенными параметрами, компенсирующие устройства, точки промежуточного отбора мощности и ИРМ;

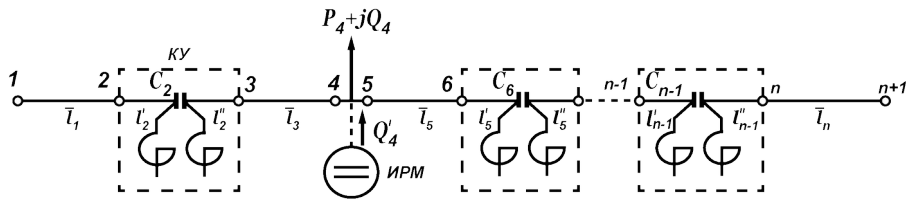


Рисунок 1 - Схема электропередачи с компенсирующими устройствами

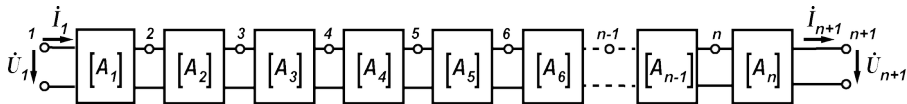


Рисунок 2 - Каскад последовательно соединенных четырехполюсников

б) погонные параметры: L_0, C_0, r_0, g_0 участков линии электропередачи l_i между устройствами компенсации, где $i = 1 \div n$ – индекс участка;

в) параметры C_i, L'_i, L''_i компенсирующих устройств;

г) активная и реактивная мощности отбора, представленные в виде постоянных сопротивлений r_i и x_i или в виде статических характеристик, величина реактивной мощности Q'_i в узлах подключения ИРМ;

д) параметры режима: активная (P_m) и реактивная (Q_m) мощности начала ($m = 1$) или конца ($m = n + 1$) линии, модуль (U_k) и фаза (ψ_k) напряжения конца ($k = n + 1$) или начала ($k = 1$) линии, причем $m \neq k$;

е) ограничения в промежуточных узлах компенсированной линии по напряжению – $U_{min} < U_i < U_{max}$.

Требуется определить параметры режима P, Q, U, ψ в любой произвольной точке линии, в том числе в узлах $i = 2 \div n$.

Математическая модель эквивалентного четырехполюсника

Представление схемы замещения в виде каскада последовательно соединенных четырехполюсников (рисунок 2) позволяет записать уравнения режима отдельных составных четырехполюсников в виде зависимостей:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U(\dot{U}_2, \dot{I}_2); \\ \dot{I}_1 = I(\dot{U}_2, \dot{I}_2), \end{cases} \quad (1)$$

здесь \dot{U} и \dot{I} – комплексные напряжения и токи; 1, 2 – индексы входа и выхода четырехполюсника.

Матрица $[A]$ коэффициентов уравнения (1) имеет следующий вид:

- для четырехполюсников, представляющих участки линии с распределенными параметрами [1]

$$A_i = \begin{bmatrix} \text{ch } \gamma l_i & Z \text{ sh } \gamma l_i \\ \frac{1}{Z} \text{ sh } \gamma l_i & \text{ch } \gamma l_i \end{bmatrix}; \quad (2)$$

где $i = 1, 3, 5, \dots, n$ – индекс участка линии, Z и γ – волновое сопротивление и коэффициент распространения, соответственно, которые вычисляются из соотношений:

$$Z = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}}, \gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)};$$

для четырехполюсников, представляющих компенсирующие устройства:

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{\omega^2 L'_i C_i} & -j \frac{1}{\omega C_i} \\ -(\frac{1}{\omega L'_i} + \frac{1}{\omega L''_i} - \frac{1}{\omega^3 L'_i L''_i C_i}) & 1 - \frac{1}{\omega^2 L''_i C_i} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

здесь C_i, L'_i, L''_i – параметры элементов Π -образной схемы замещения компенсирующего устройства $i = 2, 4, \dots, n - 1$;

для четырехполюсников, представляющих промежуточный отбор мощности и мощность ИРМ:

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{r_i} - j \frac{1}{x_i} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $r_i = \frac{U_i^2}{P_i}$ и $x_i = \frac{U_i^2}{Q_i - Q'_i}$ – параметры, учитывающие отбор мощности и вычисляемые по заданным статическим характеристикам на заданном шаге итерации, Q'_i – мощность ИРМ, $i = 2, 4, \dots, n - 1$ – индекс узла линии, в котором установлено устройство компенсации или подключена нагрузка.

Матрица $[A]$ эквивалентного четырехполюсника (рисунок 3) представляется в виде произведения матриц $[A_i]$ элементарных четырехполюсников, в виде:

$$[A] = \Pi_1^n [A_i]. \quad (5)$$

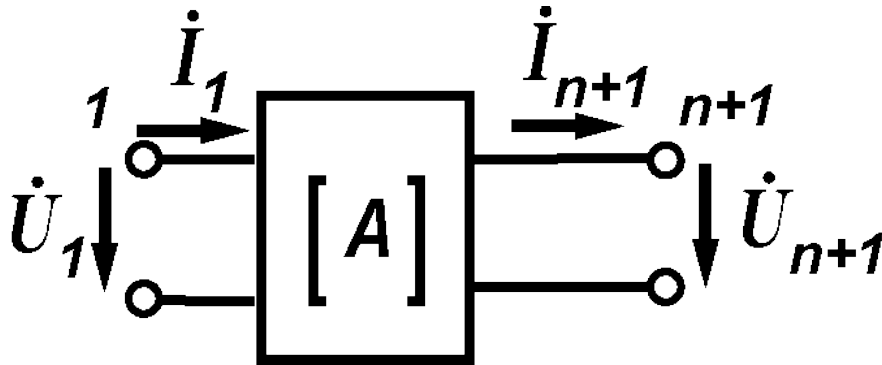


Рисунок 3 - эквивалентный четырехполюсник

Запишем уравнения режима для эквивалентного четырехполюсника в γ форме [3]:

$$[\dot{I}_m] = [Y_{mk}] \dot{U}_k, \quad (6)$$

где $m \neq k; k = 1, n + 1$ – индексы входа (1) и выхода ($n + 1$) эквивалентного четырехполюсника; $Y_{mk} = g_{mk} - jb_{mk}$ – элемент матрицы γ – параметров уравнения (6), вычисляемых по полученной матрице $[A]$ эквивалентного четырехполюсника:

$$[Y_{mk}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1,n+1} \\ Y_{n+1,1} & Y_{n+1,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{n+1,n+1}}{A_{1,n+1}} & \frac{A_{1,n+1}A_{n+1,1} - A_{11}A_{n+1,n+1}}{A_{1,n+1}} \\ -\frac{1}{A_{1,n+1}} & \frac{A_{11}}{A_{1,n+1}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Уравнения установившегося режима для эквивалентного четырехполюсника запишем в полярной форме:

$$P_m = U_m \sum_{k=1, n+1} U_k [g_{km} \cos(\psi_m - \psi_k) - b_{km} \sin(\psi_m - \psi_k)]; \quad (8)$$

$$Q_m = U_m \sum_{k=1, n+1} U_k [g_{km} \sin(\psi_m - \psi_k) + b_{km} \cos(\psi_m - \psi_k)]; \quad (9)$$

$$U_k = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}; \quad (10)$$

$$\sin(\psi_k) = \frac{1}{U_k b_{kk} - \frac{Q_k}{U_k}} \left[\frac{P_k}{U_k} \cos \psi_k - U_k g_{kk} \cos \psi_k - U_m g_{mk} \cos \psi_m - U_m b_{mk} \sin \psi_m \right], \quad (11)$$

где

$$p = U_k \left[\frac{g_{mk}}{b_{mm}} \sin(\psi_m - \psi_k) + \frac{b_{mk}}{b_{kk}} \cos(\psi_m - \psi_k) \right], b = -\frac{Q_m}{b_{mm}}, m, k = n + 1, m \neq k.$$

В этих формулах активная P_{n+1} и реактивная Q_{n+1} мощности в узле $n + 1$, берутся со знаком минус, что соответствует мощности нагрузки, подключенной к указанному узлу [4].

Расчетные соотношения

Для решения системы уравнений (8)-(11) применяем классический итерационный подход. Критерием окончания расчета служит приращение $\Delta \sin \psi_k$ в двух последовательных шагах итерации с последующей проверкой величины заданного небаланса мощностей ΔP_m и ΔQ_m . По параметрам режима в конце ВЛ можно определить параметры режима в любом из узлов $i = 2 \div n$ по выражениям:

$$U_i = \sqrt{A_i^2 U_{i+1}^2 + B_i^2 I_{i+1}^2 + 2A_i B_i U_{i+1} I_{i+1} \cos(\psi_A - \psi_B + \psi_{i+1} - \gamma_{i+1})}; \quad (12)$$

$$\psi_i = \arctg \frac{A_i U_{i+1} \sin(\psi_A + \psi_{i+1}) + B_i I_{i+1} \sin(\psi_B + \gamma_{i+1})}{A_i U_{i+1} \cos(\psi_A + \psi_{i+1}) + B_i I_{i+1} \cos(\psi_B + \gamma_{i+1})}; \quad (13)$$

$$P_i = \sqrt{C_i^2 U_{i+1}^2 + D_i^2 I_{i+1}^2 + 2C_i D_i U_{i+1} I_{i+1} \cos(\psi_C - \psi_D + \psi_{i+1} - \gamma_{i+1})} U_i \cos(\psi_i - \gamma_i); \quad (14)$$

$$Q_i = \sqrt{C_i^2 U_{i+1}^2 + D_i^2 I_{i+1}^2 + 2C_i D_i U_{i+1} I_{i+1} \cos(\psi_C - \psi_D + \psi_{i+1} - \gamma_{i+1})} U_i \sin(\psi_i - \gamma_i), \quad (15)$$

где $I_{i+1} = \frac{\sqrt{P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2}}{U_{i+1}}$; $\gamma_{i+1} = \psi_{i+1} - \arctg \frac{Q_{i+1}}{P_{i+1}}$; $\gamma_i = \arctg \frac{C_i U_{i+1} \sin(\psi_C + \psi_{i+1}) + D_i I_{i+1} \cos(\psi_D + \gamma_{i+1})}{C_i U_{i+1} \cos(\psi_C + \psi_{i+1}) + D_i I_{i+1} \sin(\psi_D + \gamma_{i+1})}$;

$A_i e^{j\psi_A}, B_i e^{j\psi_B}, C_i e^{j\psi_C}, D_i e^{j\psi_D}$ -параметры $[A_i]$ четырехполюсника соответственно
 $\dot{A} = \dot{A}_{11}; \dot{B} = \dot{A}_{12}; \dot{C} = \dot{A}_{21}; \dot{D} = \dot{A}_{22}$.

В начале расчета в выражениях (12)-(15) индекс $(i + 1)$ принимает значения $(n + 1)$ – индекса узла приемного конца линии – соответственно в качестве начальных параметров принимаются $P_{n+1}, Q_{n+1}, U_{n+1}, \psi_{n+1}$ конца электропередачи. В последующих итерациях применяются те же соотношения (12)-(15) с подстановкой в них параметров $[A_i]$ соответствующего четырехполюсника и найденных из расчета параметров предыдущего четырехполюсника.

Если отбор мощности задан постоянными сопротивлениями и в узлах $i = 2 \div n$ выполняются налагаемые ограничения по напряжению, то расчет завершен. При задании отбора мощности статическими характеристиками нагрузки, последние аппроксимируются многочленами второй степени [q, q],

$$\begin{cases} P^{i+1} = a_0 + a_1 U^i + a_2 (U^i)^2; \\ Q^{i+1} = b_0 + b_1 U^i + b_2 (U^i)^2, \end{cases} \quad (16)$$

где a_l и b_l ($l = 0, 1, 2$) - коэффициенты полиномов, определяемые составом потребителей, верхний индекс i – шаг последовательных приближений.

В соответствии с расчетом напряжений в узлах отбора в первом шаге итерации производится уточнение их мощностей P_i и Q_i , а по ним, соответственно, параметров r_i и x_i .

Режим в произвольной точке участка линии с распределенными параметрами, представленного четырехполюсником, находится путем решения системы уравнений [5], [6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{U}_{i+1} \operatorname{ch} \gamma(l_i - s) + Z \dot{I}_{i+1} \operatorname{sh} \gamma(l_i - s); \\ \dot{I}_s = \frac{1}{Z} \dot{U}_{i+1} \operatorname{ch} \gamma(l_i - s) + \dot{I}_{i+1} \operatorname{sh} \gamma(l_i - s); \\ P_s - jQ_s = \dot{U}_s \dot{I}_s; \\ P_{i+1} - jQ_{i+1} = \dot{U}_{i+1} \dot{I}_{i+1}, \end{cases} \quad (17)$$

где $i = 1, 3, \dots, n$ - индекс участка линии в заданной точке s которого необходимо определить параметры режима; l_i - длина участка линии с распределенными параметрами; s - расстояние от начала соответствующего участка ($i = 1, 3, \dots, n$) до искомой точки.

Апробация рассматриваемого подхода

Рассмотрим применение рассмотренной методики расчета на примере электропередачи 500 кВ Бурейская ГЭС-Хабаровская 2 (рисунок 4).

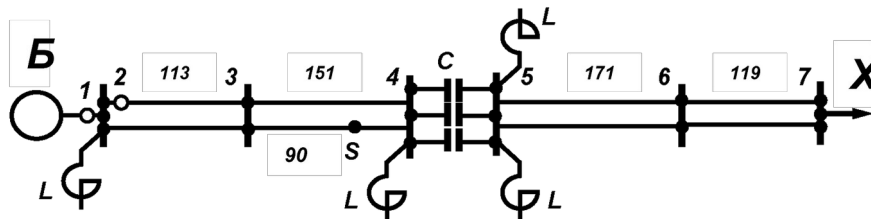


Рисунок 4 - Электропередача Бурейская ГЭС -Хабаровская 2

Погонные параметры ЛЭП: $r_0 = 0,021$ Ом/км; $C_0 = 1,22 \cdot 10^{-8}$ Ф/км; $L_0 = 0,9 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $C = 0,995 \cdot 10^{-4}$ Ф; $L = 4,82$ Гн.

Параметры режима концов электропередачи: $U_1 = 503,5$ кВ; $\psi_1 = 0$; $P_7 = 1300$ МВт; $Q_7 = 200$ МВар.

Результаты расчета сведены в таблицу (таблица 1)

Таблица 1 - Расчет установившегося режима электропередачи Бурейская ГЭС -Хабаровская 2

№ узла	Параметры режима			
	P, МВт	Q, МВар	U, кВ	, рад
1	1364,5	-173,4	503,5	0
2	1364,5	-341,1	503,5	0

3	1350,5	-186,7	512,5	-0,1413
4	1333,0	48,0	510,7	-0,3248
5	1332,8	-247,8	509,7	-0,1606
6	1313,4	21,0	511,4	-0,3653
7	1300,0	200,0	499,9	-0,5076
s	1340,1	-49,2	513,4	-0,2496

Заключение

В работе предложена методика расчета установившегося режима ВЛ, которая учитывает распределенность параметров участков линии и наличие в отдельных узлах устройств компенсации реактивной мощности, а также источников реактивной мощности.

Модель эквивалентного четырехполюсника позволяет определить параметры режима электропередачи в произвольной точке линии, что продемонстрировано на примере электропередачи ЛЭП 500 Бурейская ГЭС – Хабаровская 2.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Адонц Г.Т. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генераторов и нагрузок. / Г.Т. Адонц // Электричество. — 1971. — 1.
2. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
3. Афанасьев А.П. Учет динамики развития электрических систем при выборе и установке компенсирующих устройств. / А.П. Афанасьев, Д.С. Павличенко // Вестник Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема. — 2018. — 33.
4. Веников В.А. Электрические системы Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения: в 6 т.; / В.А. Веников, В.В Худяков, Н.Д. Анисимова — М.: Высшая школа, 1972. — 3 т.
5. Готман В.И. Обобщенные статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны. / В.И. Готман, Г.З. Маркман // Известия Томского политехнического института. — 2007. — 4. — с. 131-134.
6. Готман В.И. Единый алгоритм оценки статистической устойчивости и расчета установившихся режимов энергосистем. / В.И. Готман // Известия Томского политехнического института. — 2007. — 4. — с. 134-138.
7. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов — М.: Энергия, 1979. — 455 с.
8. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю.С. Железко — М.: Энергоиздат, 1981. — 200 с.
9. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И.Н. Ковалев — М.: Энергоиздат, 1990. — 198 с.
10. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов — М.: МЭИ, 2007. — 488 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Adoncz G.T. Algoritm rascheta ustanovivshegosya rezhima e'nergosistemy' s uchetom nelinejny'x xarakteristik generatorov i nagruzok [Calculations Algorithm for Steady State Mode of the Power System, Taking into Account the Nonlinear Characteristics of Generators and Loads]. / G.T. Adoncz // E'lektrichestvo [Electricity]. — 1971. — 1. [in Russian]
2. Aleksandrov G.N. Peredacha e'lektricheskoy e'nergii peremenny'm tokom [Transmission of Electrical Energy by Alternating Current] / G.N. Aleksandrov — L.: E'nergoatomizdat, 1990. — 176 p. [in Russian]
3. Afanas'ev A.P. Uchet dinamiki razvitiya e'lektricheskix sistem pri vybore i ustanovke kompensiruyushhix ustrojstv [Accounting of the Development Dynamics Electrical Systems with Choosing and Installing Compensating Devices]. / A.P. Afanas'ev, D.S. Pavlichenko // Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Sholom-Alejxema [Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem]. — 2018. — 33. [in Russian]
4. Venikov V.A. E'lektricheskie sistemy' [Electrical Systems] Power Transmission by Alternating and Direct Current of High Voltage: in 6 vol.; / V.A. Venikov, V.V Xudyakov, N.D. Anisimova — M.: Vy'sshaya shkola, 1972. — 3 vol. [in Russian]
5. Gotman V.I. Obobshhenny'e staticheskie xarakteristiki e'lektroe'nergeticheskix podsystem i ix koeffitsienty' krutizny' [Generalized Static Characteristics of Electric Power Subsystems and Their Slope Coefficients]. / V.I. Gotman, G.Z. Markman // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo instituta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute]. — 2007. — 4. — p. 131-134. [in Russian]
6. Gotman V.I. Edinyj algoritm ocenki statisticheskoy ustojchivosti i rascheta ustanovivshixsya rezhimov e'nergosistem [Unified Algorithm for Estimating Statistical Stability and Calculating Steady State Modes of Power Systems]. / V.I. Gotman //

Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo instituta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute]. — 2007. — 4. — p. 134-138. [in Russian]

7. Zhdanov P.S. Voprosy' ustojchivosti e'lektricheskix sistem [Issues of Stability of Electrical Systems] / P.S. Zhdanov — M.: E'nergiya, 1979. — 455 p. [in Russian]

8. Zhelezko Yu.S. Kompensaciya reaktivnoj moshhnosti v slozhny'x e'lektricheskix sistemax [Reactive Power Compensation in Complex Electrical Systems] / Yu.S. Zhelezko — M.: E'nergoizdat, 1981. — 200 p. [in Russian]

9. Kovalev I.N. Vy'bor kompensiruyushhix ustrojstv pri proektirovanii e'lektricheskix setej [The Choice of Compensating Devices in the Design of Electrical Networks] / I.N. Kovalev — M.: E'nergoizdat, 1990. — 198 p. [in Russian]

10. Ry'zhov Yu.P. Dal'nie e'lektroperedachi sverxvy'sokogo napryazheniya [Long-Distance Transmission of Extra-High Voltage] / Yu.P. Ry'zhov — M.: ME'I, 2007. — 488 p. [in Russian]