

УДК 577.4

ЭКСПРЕСС–МЕТОД ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**ЮСИФОВ Н.А.***ЦДУ ОАО «Азербэнеджи»*

В статье, в новых условиях функционирования энергосистем с учетом требований диспетчерских управлений, излагаются основные положения разработанного экспресс-метода оценки устойчивости, основанного на положениях теоретической механики.

В условиях развития энергосистемы, наряду с решением задачи поиска ее слабых мест, выявления характера их проявления и динамики, важной задачей является также контроль за состоянием режимной надежности и устойчивости энергосистемы. Для реализации последней задачи необходимы оценочные критерии, которые удовлетворяли бы требованиям диспетчерского управления в условиях структурных и режимных изменений.

Для оперативно-диспетчерского управления необходимо:

- располагать более общими подходами в оценке устойчивости как в режимах малых (статическая устойчивость), так и больших возмущений (динамическая устойчивость);
- оперативно определять запас устойчивости энергосистемы;
- располагать эффективными и физически ясными критериями и алгоритмами.

В процессе поиска таких подходов нами обращено внимание на предложение, изложенное в [1], суть которого заключается в рассмотрении задачи с позиции энергетических процессов, происходящих в ЭС в переходных режимах. Автор [1] назвал этот подход «Энергетическим».

В основе этого подхода лежит обоснование степени применимости некоторых основных положений теоретической механики к электрическим системам. Такие теоремы механики, как теоремы об изменении количества движения, о движении центра инерции, неприменимы к ЭС. Они справедливы для консервативных механических систем. Консервативная электрическая система по всем признакам подобна системе механической. ЭС же рассматривается как позиционная [2,3], где учитываются активные сопротивления линий и нагрузок, а электромагнитные моменты определяются позицией, которую занимает данный генератор по отношению к другим, следовательно, позиционная ЭС - это диссипативная система. В этой системе взаимодействие синхронных генераторов во время возмущенного движения взаимно не уравновешивается, что противоречит третьему закону Ньютона.

Согласно теореме Лагранжа-Дирихле, которая является частным случаем теоремы А.М.Ляпунова [5], в консервативной системе, если потенциальная энергия имеет минимум, то это положение равновесия устойчиво, если максимум – то неустойчиво. Это означает, что функция потенциальной энергии позволяет определить положение устойчивого равновесия.

В реальных ЭС, в которых отсутствуют протяженные линии электропередач, а сама ЭС носит концентрированный характер: активные составляющие сопротивлений, и угол α , дополняющий фазу взаимного сопротивления, как правило, малы.

Для этого воспользуемся двумя соотношениями для суммарной мощности и энергии применительно к сложной системе.

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n E_i^2 g_i + \sum_{i=1}^n E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij} (E_i - E_j \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$W_{\Sigma} = -\sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_{Ti} \delta_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} (1 - \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

Эти выражения позволяют использовать те особенности, которые привносит энергетический подход. Они позволяют проводить оценку устойчивости не какого-то конкретного генератора или сечения ЭС, а в целом ЭС, причем как при малых, так и больших возмущениях. Первый член в выражении (1) отражает влияние нагрузки в генерирующих узлах, а первый член в выражении (2) отражает небаланс мощности на валу (ускорение или торможение), возникающий при возмущении в системе. Причем этот избыток моментов возникает, как правило, не на одном конкретном агрегате, а повсеместно по всем генераторам системы. Это подтверждается тем, что, как правило, в эксплуатационной и расчетной практике положение равновесия покидают одновременно все генераторы.

Первая производная потенциальной энергии по координате δ_i равна

$$M = \frac{\partial W_{\Sigma}}{\partial \delta_i} = -\Delta P_{Ti} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \sin \delta_{ij},$$

-моменту на валу генератора. Равенство нулю второй производной укажет на режим максимально возможного момента по условиям устойчивости, т.е. режим на вершине характеристики мощности.

Соответствующая этому условию координата δ_i определяет максимальные значения мощности $P_{\Sigma \max}$ по (1).

Вторая производная потенциальной энергии:

$$\frac{\partial^2 W_{\Sigma}}{\partial \delta_i^2} = -E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \cos \delta_{ij} = 0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \delta_i = -\frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \cos \delta_j}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j b_{ij} \sin \delta_j} \quad (3)$$

Построение потенциальной функции в каждом режиме дает возможность определить режим устойчивого равновесия и значения $P_{\Sigma 0}$, что является достаточным для оценки запаса устойчивости системы

$$K_3 = \frac{P_{\Sigma \max} - P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma 0}}, \quad (4)$$

В основу разработанной экспресс – методики заложены следующие положения, вытекающие как из вышеизложенных теоретических положений, так и требований

диспетчерского управления в условиях непрерывного изменения схем и режимов энергосистемы:

1. Методика должна быть: максимально простой, обеспечивающей быстрое получение результатов; физически понятной; использующей минимум доступной информации; не требующей проведения сложных расчетов.
2. Методика должна выявлять слабые элементы в системе с тем, чтобы устойчивость проверялась в отношении именно этого ограниченного числа элементов.
3. Статическая устойчивость – есть устойчивость не отдельных элементов системы, а системы в целом. Нарушение статической устойчивости генераторов системы происходит одновременно, с той лишь разницей, что к неустойчивому состоянию они движутся с различной скоростью. Поэтому статическую устойчивость достаточно проверить в отношении одного- двух слабых генераторов или сечений.
4. Динамическая устойчивость – это устойчивость отдельных элементов системы. Поэтому проверку устойчивости по отношению к большим возмущениям следует также проверять по отношению, главным образом, к слабым элементам.
5. Методика должна объединить три оценки:
 - выявление слабых элементов;
 - оценки статической устойчивости, коэффициентов ее запаса;
 - оценки динамической устойчивости:

Использование энергетического подхода позволит с помощью экспресс-метода получить инженерную оценку состояния устойчивости энергосистемы. Блок-схема экспресс-метода представлена на рис.1. и состоит из нижеследующих блоков.

Блок-1. Производится расчет установившегося исходного режима по заданной схеме и загрузки генераторов электростанции. Расчет производится с помощью программы «Мустанг», либо по любой другой программе, находящейся в эксплуатации служб режима диспетчерского управления. При этом, наряду с традиционной информацией, фиксируются и запоминаются углы векторов ЭДС генераторов.

Блок-2. Формируется расчетное возмущение, которое в виде малого приращения электромагнитной мощности создается на К-том генераторе (ΔP_K).

Блок-3. Производится повторный расчет режима с учетом приложенного возмущения на К-том генераторе. При этом, согласно методу 2-х генераторов [2], изменяются мощности на К-том и на балансирующем генераторах. На остальных генераторах мощности остаются постоянными. Рассчитываются углы векторов ЭДС генераторов. Последние фиксируются, т.к. используются в следующем блоке.

Блок-4. Производится расчет собственной синхронизирующей мощности К-того генератора и его синхронизирующие связи с остальными n-2 генераторами (без балансирующего). При этом определяется разность между углами векторов ЭДС генераторов, полученных в блоках 1 и 3. Для расчета синхронизирующей мощности, углы переводятся в радианы, а приращение электромагнитной мощности относится к мощности генераторов в исходном режиме. Таким образом, синхронизирующие мощности получаются в безразмерном виде.

Собственная синхронизирующая мощность i-того генератора определяется как

$$S_{ii} = \frac{dP_i}{d\delta_i} = \frac{\Delta}{\Delta_i},$$

где

Δ - определитель матрицы Якоби

Δ_i - адьюнкты определителя Δ , полученного вычерчиванием i -той строки и столбца.

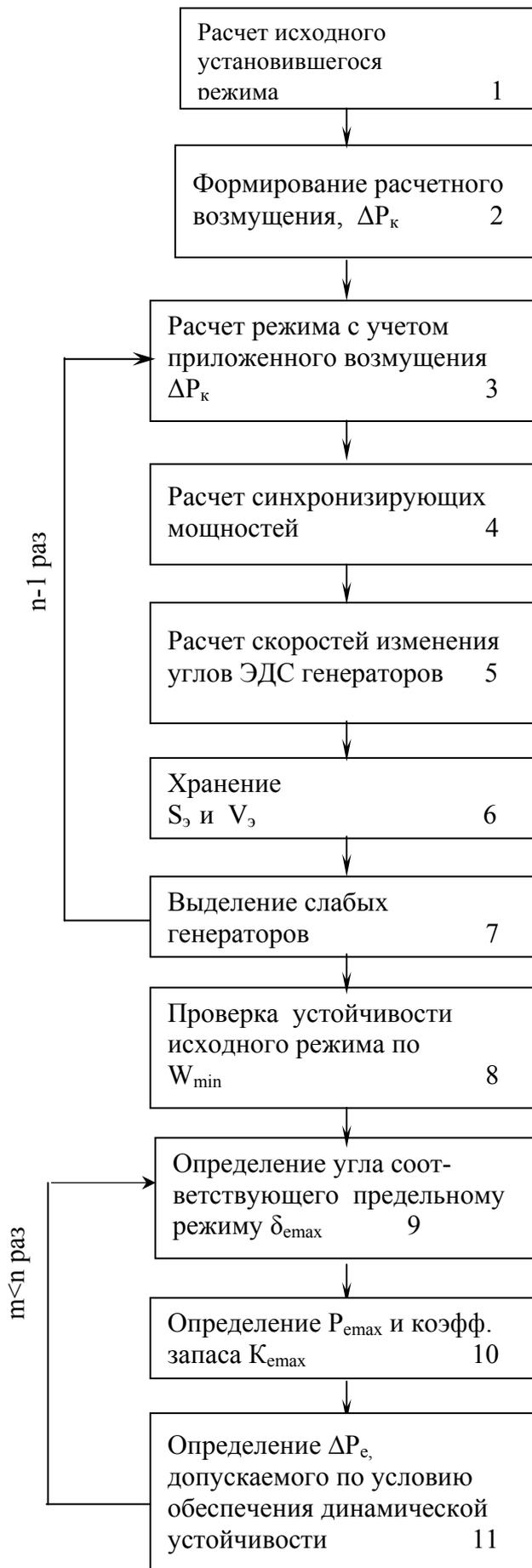


Рис.1. Блок – схема методики экспресс- оценки устойчивости

n – число генераторов в системе, вместе с балансирующим
 m – число выделенных слабых генераторов $m < n$

Значение синхронизирующей мощности используется в блоке 4.

Блок-5. Производится расчет скоростей изменения углов векторов ЭДС генераторов при том же возмущении по выражению, также в безразмерном виде.

$$V_{\delta} = \frac{\Delta\delta}{\Delta P} P_0 \qquad V_u = \frac{\Delta U}{U_0} \cdot \frac{P_0}{\Delta P},$$

где

$\Delta\delta$ - изменение угла ротора синхронного генератора в радианах;

ΔP - возмущение в виде изменения электромагнитного момента какого-либо генератора (МВт);

ΔU - изменение напряжения в узле (кВ);

P_0, U_0 - значения мощности и напряжения в исходном режиме.

Блок-6. В блок могут быть заведены граничные значения синхронизирующих мощностей и скоростей, при сравнении с которыми оказывается возможным выявление слабых с точки зрения устойчивости генераторов системы. Условие выбора:

$$S_k \geq S_{гр} \qquad V_k \leq V_{гр}$$

Значения $S_{гр}$ и $V_{гр}$ для каждой энергосистемы отличны и назначаются.

Блок-7. Выделяются слабые генераторы путем сравнения собственных значений и скоростей. Они в дальнейшем становятся объектами исследования на устойчивость.

Блок-8. С помощью расчета минимума потенциальной функции системы проверяется устойчивость исходного режима.

Блок-9. Для ℓ слабого генератора определяется максимальное значение угла вектора ЭДС этого генератора по выражению (3) или его более удобному виду,

$$tg \delta_t = \frac{\sum_{j=1, j \neq \ell}^b \delta_{\ell j}}{\sum_{j=1, j \neq \ell}^n \delta_{\ell j} + g \delta_{\ell j}},$$

где

$\ell = 1 \dots m$, m -число выделенных слабых генераторов.

Значения синхронизирующих мощностей $S_{\ell j}$ и учет $\delta_{\ell j}$ определены в расчетных блоках 3 и 4.

Блок-10. По расчетному значению δ_{ℓ} определяется максимум характеристики мощности, а по последнему – коэффициент запаса $K_{3\ell}$ по условию обеспечения статической устойчивости.

Это тот запас статической устойчивости, которым обладает ℓ -генератор.

Блок-11. Определяется допускаемый наброс мощности на ℓ -том генераторе по условию обеспечения динамической устойчивости, как

$$\Delta P_{\ell} = P_{0\ell} K_{3\ell} K_g,$$

где $P_{0\ell}$ – мощности ℓ -генератора в исходном режиме

$K_{3\ell}$ – коэффициент запаса по условию обеспечения статической устойчивости в исходном режиме, определяется по выражению (4)

$K_g = 0,75$, определяется согласно [3], постоянно для всех энергосистем, режимов и схем, так как вытекает из известного условия обеспечения динамической устойчивости: равенстве площадей ускорения и торможения, применяемого для простых и сложных систем.

Блоки 2–7. Выполняется для всех n генераторов системы.

Блоки 9–11. Выполняется для выделенных m слабых генераторов, число которых меньше n .

Значение $K_g = 0,75$,

По полученным значениям $K_{3\ell}$ и ΔP_ℓ можно формировать объемы управляющих воздействий противоаварийной автоматики.

Пример [6] для апробации вышеизложенного представляется ниже. В системе – «станция – станция – шины постоянного напряжения» (рис.2.):

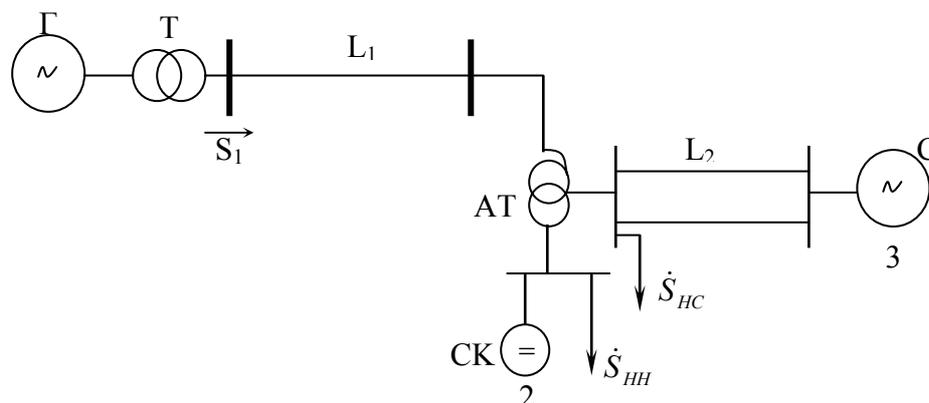


Рис.2. Схема энергосистемы.

Г – гидрогенераторы 6хСВФ – 1500/130 – 88

Т – трансформаторы 2хТДЦ – 400 000/500

СК – синхронные компенсаторы 4хКСВ–100 000–11 (400 Мвар)

С – шины приемной системы

Линия: $L_1 = 300$ км $U_{1Н} = 500$ кВ $L_2 = 200$ км $U_{2Н} = 220$ кВ

Нагрузка: $S'_{НС} = 450 + j 218$ МВА $S'_{НН} = 50 + j 24$ МВА

На гидрогенераторах установлены АРВ СД₁, поддерживающие в начале L_1 напряжение постоянным. На СК установлены АРВ ПД₁, поддерживающие постоянным ЭДС ЭС за переходным сопротивлением E'_2 . Исходный режим и схемы имеют следующие данные

$P_{10} = 800$ МВт	$E'_2 = 683,3$ кВ	$Z_{13} = 389,5$ Ом	
$U_1 = 522$ кВ	$U_3 = 471,2$ кВ	$\delta_{23} = 7,55^\circ$	$\delta_{13} = 23,59^\circ$
$U_2 = 500$ кВ	$Z_{12} = 538,1$ Ом	$\alpha_{12} = -7,1^\circ$	$\alpha_{13} = 6,19^\circ$

На рис.3. демонстрируются функции P и W от угла δ при различных значениях активной составляющей проводимости в рассматриваемом примере. Как видно, вариация активной составляющей проводимости несколько смещает характеристику мощности при сохранении предельно передаваемой мощности $P_{пр}$, что важно, т.к. запас устойчивости определяется именно по этому показателю.

Кривая изменения потенциальной энергии в области положительных углов δ , образует два экстремума- минимум и максимум, каждый из которых имеет физический смысл. Минимум потенциальной функции свидетельствует о режиме устойчивого равновесия при $\delta_{1\min} \approx 35,5^\circ$.

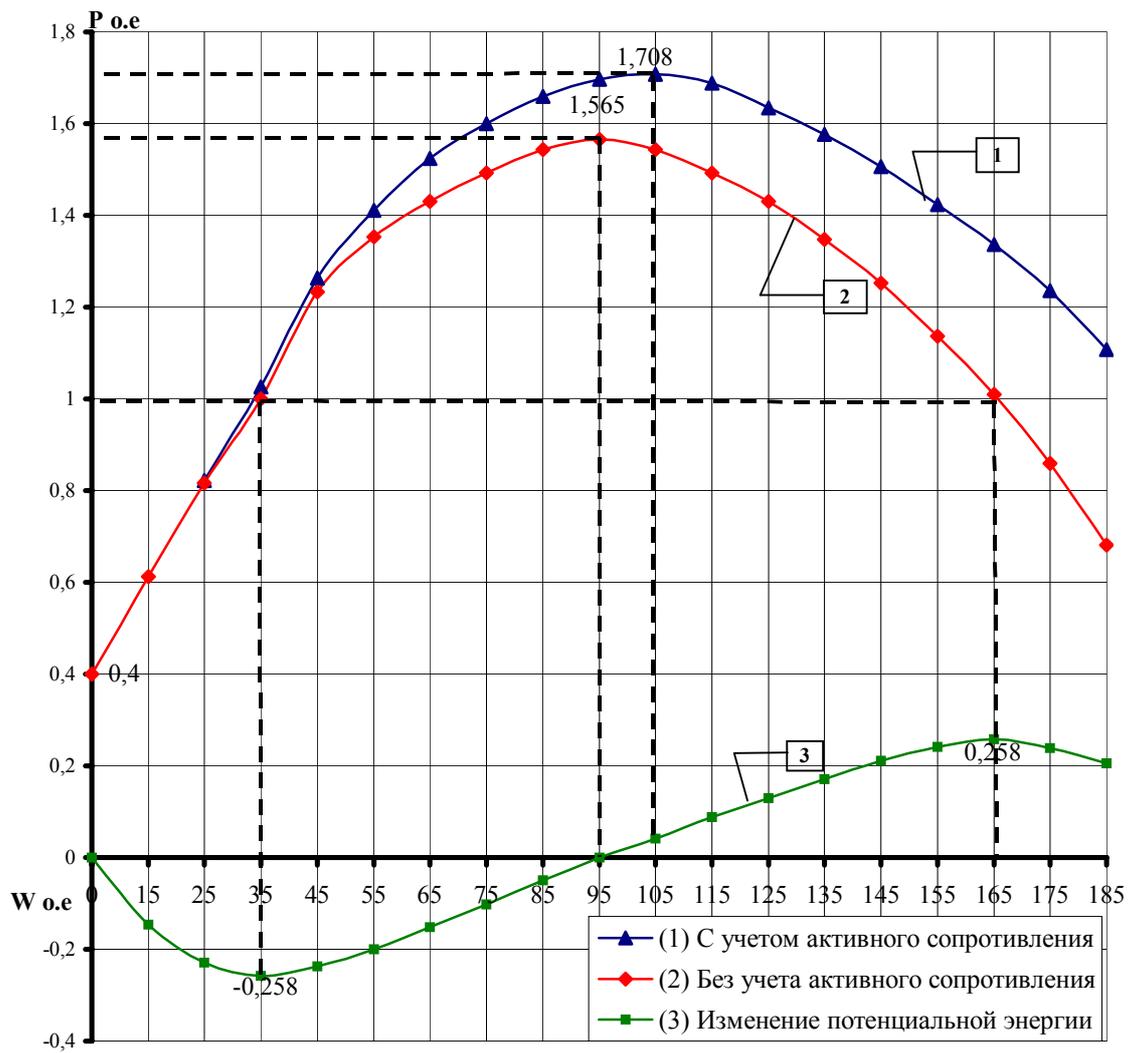


Рис.3 Характеристика мощности и потенциальной энергии в сложной схеме

Максимум мощности 1366МВт имеет место при угле $\delta_{1max} = 105,3^{\circ}$.

При неучете активного сопротивления в схеме (нагрузка сохранена с учетом активной составляющей) на основании (1) определяем значение угла δ_{2max} , соответствующее максимуму характеристики мощности.

$$\delta_{2max} = 95^{\circ}$$

При этом $P_{2max} = 1252$ МВт

Таким образом, коэффициент запаса составляет

$$K_{23} = \frac{1252 - 800}{800} 100\% = 56,5\%$$

С учетом активного сопротивления

$$P_{1max} = 1366\text{МВт}$$

$$K_{13} = 70,75\%$$

т.е. неучет активного сопротивления снижает предел передаваемой мощности и запас по устойчивости, что делает результаты более надежными (с большим запасом по устойчивости).

На том же рис.3. представлена функция потенциальной энергии, фиксирующая минимум (устойчивости) в исходном режиме.

Выводы

Разработана методика экспресс-оценки устойчивости энергосистемы, включающая в едином комплексе:

- оценку слабых синхронных генераторов энергосистемы на основе синхронизирующих мощностей и скорости изменения углов ЭДС синхронных генераторов;
- проверку устойчивости исходного режима на основе минимума функции потенциальной энергии;
- определение значения угла по передаче, соответствующего максимальной передаче мощности и значению максимума мощности и коэффициента запаса исходного режима с помощью функции потенциальной энергии;
- консервативное представление энергосистемы в расчетах устойчивости, являющееся строгим условием при применении энергетического подхода, не влечет существенных отличий в определенных пределах передаваемой мощности.

-
1. *Лукашов Э.С.* Введение в теорию электрических систем. Наука. С.О. Новосибирск, 1981.
 2. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем. –М., Энергия, 1979
 3. *Лукашов Э.С., Калюжный А.Х., Лизалек Н.Н.* Длительные переходные процессы в энергетических системах. Наука. С.О. Новосибирск, 1985.
 4. *Горев А.А.* Переходные процессы в синхронной машине. М.-Л. ГЭИ. 1950
 5. *Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. – Москва, Одесса, Гостехиздат, 1950
 6. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для вузов (В.В.Ежков, Н.Н. Зеленохат, Н.В. Литкенс и др.; Под. ред. В.А. Строева). – М.: Знак, 1996. – 224с., ISBN 5- 87789 – 016 – 6.

ENERJISISTEMLƏRİN DAYANIQLIĞININ QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ ÜÇÜN EKSPRES METODUN İŞLƏNMƏSİ

YUSİFOV N.A.

Məqalədə enerjisistəmlərin yeni fəaliyyəti şəraitində, dispetçer idarəçiliyinin tələblərini nəzərə alaraq, enerjisistəmlərin dayanıqlığının hesabı metodunun əsas müddələri öz əksini tapmışdır. Ekspres metod nəzəri mexanikanın əsasları üzərində qurulmuşdur.

EXPRESS-METHOD OF EVALUATION OF POWER SYSTEM STABILITY

YUSİFOV N. A.

Unitary clauses of the developed express-method of evaluation of power system stability, based on the unitary clauses of engineering mechanic were expounded in the article in new conditions of functioning of power system taking into consideration the requirements of the monitoring.