

УДК 621.311

**ПРОБЛЕМЫ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ НАГРУЗКИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**



**PROBLEMS OF STATIC STABILITY OF LOAD UNITS OF
POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Беседин Евгений Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет
omega54@mail.ru

Власко Павел Станиславович

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
pvlasko@inbox.ru

Бондарь Алексей Витальевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
alexbondar123@gmail.com

Рейзов Александр Сергеевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
79189855535@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы обеспечения устойчивости электроэнергетических систем. Отдельно рассмотрены вопросы исследования и обеспечения устойчивости узлов нагрузки систем электроснабжения промышленных предприятий. Подробно рассмотрены характеристики отдельных компонентов, входящих в узел нагрузки промышленного предприятия. На основании рассмотренных моделей был произведен анализ статической устойчивости узлов нагрузки систем электроснабжения завода электросталей и агломерационной фабрики металлургического комбината. Сделаны выводы о запасе статической устойчивости данного узла нагрузки и о влиянии конденсаторных установок на запас статической устойчивости данных узлов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, узел нагрузки, статическая устойчивость, характеристики статической устойчивости, запас статической устойчивости.

Besedin Evgeniy Alexeevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Power Supply of Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University
omega54@mail.ru

Vlasko Pavel Stanislavovich

Student,
Kuban State Technological University
pvlasko@inbox.ru

Bondar Alexey Vitalievich

Student,
Kuban State Technological University
alexbondar123@gmail.com

Reizov Alexander Sergeevich

Student,
Kuban State Technological University
79189855535@yandex.ru

Annotation. The article deals with the main problems of ensuring the stability of electric power systems. Separately, the issues of research and ensuring the stability of load nodes of power supply systems of industrial enterprises are considered. The characteristics of individual components included in the load node of an industrial enterprise are considered in detail. On the basis of the considered models, the static stability of the load units of the power supply systems of the electric steel plant and the agglomeration plant of the metallurgical combine was analyzed. Conclusions are made about the reserve of static stability of this load node and about the influence of condenser installations on the reserve of static stability of these nodes.

Keywords: electric power system, load node, static stability, characteristics of static stability, stock of static stability.

И зучение процессов в электрической системе требует рассмотрения не только электромагнитных, но и механических процессов в ее элементах: в первичных двигателях (турбинах), их автоматических регуляторах, генераторах, двигателях нагрузки, где электрическая энергия вновь преобразуется в механическую. Именно изменение механического состояния элементов системы приводит к самым тяжелым последствиям – потере устойчивости, приводящей к нарушениям электро-

снабжения, как отдельных потребителей, так и целых регионов и даже стран. Таким образом, необходимо рассматривать и электрическое и механическое состояние системы ее режимы и электромеханические процессы.

Электромеханические процессы в системе могут иметь свойства, не выявляющиеся у отдельных элементов. Это требует исследования вопросов взаимодействия силовых элементов (турбин, генераторов, трансформаторов, линий передачи, нагрузок) и элементов управления (регуляторов, выключателей и т.п.).

Точность и быстрота расчета устанавливаются в зависимости от поставленной задачи. Выбираемый метод, прежде всего связан с выбором математической модели, описывающей переходные процессы в электрической системе, и зависит от длительности исследуемого процесса и точности задания исходной информации. Ниже приведена степень описания модели в зависимости от класса точности, которой будем далее пользоваться при изучении переходных процессов.

1-й класс. Процессы в генераторах описываются полными уравнениями Парка-Горева, либо уравнениями в естественных координатах А, В, С. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и других систем и возбуждения генератора.

2-й класс. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка-Горева. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и возбуждения генератора.

3-й класс. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка-Горева, как правило только с учетом переходных процессов в обмотках возбуждения. Влияние демпферных обмоток и систем регулирования мощности и возбуждения также учитываются упрощенно.

4-й класс. Допускается постоянство ЭДС ($E' = \text{const}$) в течение всего переходного процесса. Влияние демпферных контуров и системы регулирования не учитывается. Ниже рассматриваются модели 3 и 4 классов.

Статическая устойчивость – это способность системы сохранять исходный режим при воздействии малых возмущений или режим, близкий к исходному, если возмущение не снято. Статическая устойчивость – это абсолютное требование, и она должна обеспечиваться всегда в нормальном и послеаварийном режиме.

Узел нагрузки – группа разнородных потребителей подключенных к шинам электростанций или подстанций.

Задачи анализа электромеханических переходных процессов в узлах нагрузки рассматриваются с трех позиций.

1. Как процесс в системе влияет на нагрузку.
2. Как процесс нагрузки влияет на систему.
3. Как одна нагрузка влияет на другую.

Рассмотрим состав нагрузки различных отраслей (табл. 1).

Таблица 1 – Состав нагрузки

Вид нагрузки	Крупные АД 6–10 кВ, %	Мелкие АД, %	Крупные СД 6–10 кВ, %	Освещение, печи, быт, %
Типовая	15	35	9	41
Нефтехимическая	20	48,5	27	4,5

Поведение узлов определяет двигательная нагрузка в основном – асинхронная нагрузка.

Статические и динамические характеристики. Статические характеристики – любые зависимости, снятые при бесконечно медленном изменении напряжения:

$$P(U), Q(U), P(f), Q(f). \quad (1)$$

Динамические характеристики – зависимости во времени, а в ряде случаев от скорости изменения напряжения:

$$P\left(U, t, \frac{dU}{dt}\right) \quad (2)$$

Регулирующий эффект нагрузки – степень изменения активной или реактивной мощности при изменении напряжения, либо частоты:

$$\frac{dP}{dU}, \frac{dQ}{dU}, \frac{dP}{df}, \frac{dQ}{df} \quad (3)$$

Рассмотрим термическую нагрузку $P = \frac{U^2}{R}$.

$$\frac{dP}{dU} = \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dU} = \frac{2 \cdot U}{r} \cdot \frac{U}{U} = \frac{2 \cdot P}{U} \quad (5)$$

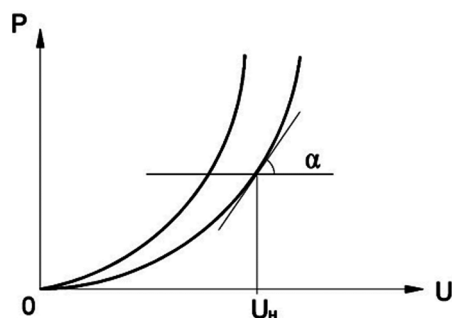


Рисунок 1 – Характеристика термической нагрузки

При $P_H=1 \cdot U_H=1$, тогда:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{2 \cdot P_H}{U_H} = 2. \quad (6)$$

Следовательно, при снижении напряжения потребляемая мощность снижается пропорционально квадрату напряжения.

Пределы изменения регулирующих эффектов нагрузки:

$$\frac{dP}{dU} = 0,3 \div 0,75; \quad (7)$$

$$\frac{dP}{df} = 1,5 \div 3,5; \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{df} = 1 \div 6; \quad (9)$$

$$\frac{dQ}{dU} = 1,5 \div 3,5. \quad (10)$$

Понятие дефицита активной мощности определяется выражением (8) и связано с уменьшением частоты. Понятие дефицита реактивной мощности определяется выражением (10) и связано с уменьшением напряжения.

Далее рассмотрим осветительную нагрузку. Зависимость мощности от напряжения для осветительной нагрузки определяется выражением:

$$P_H = kU^{1,6}. \quad (11)$$

Характеристики осветительной нагрузки приведены на рисунке 2, а на рисунке 3 приведена характеристика люминесцентной лампы

Следовательно, при снижении напряжения потребляемая мощность снижается пропорционально напряжению в степени 1,6. Как термическая, так и осветительная нагрузки не ухудшают устойчивость узла нагрузки.

Статическая устойчивость асинхронной нагрузки. Практический критерий устойчивости. Статической устойчивостью асинхронной нагрузки называется способность асинхронного двигателя вернуться в исходный или близкий к нему режим после малых возмущений.

На рисунке 4 приведена простейшая схема замещения асинхронного двигателя, при построении которой не учитывались потери активной мощности в стали, а также в меди статора.

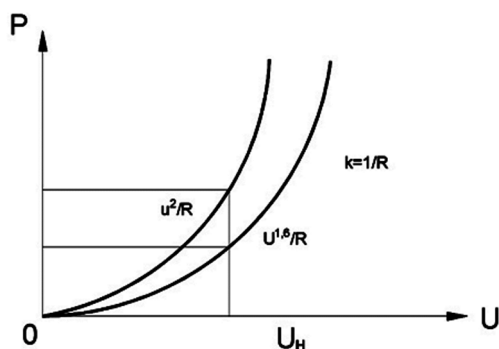


Рисунок 2 – Характеристика осветительной нагрузки

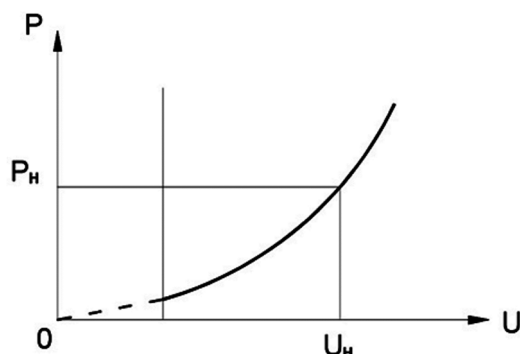


Рисунок 3 – Характеристика люминесцентной лампы

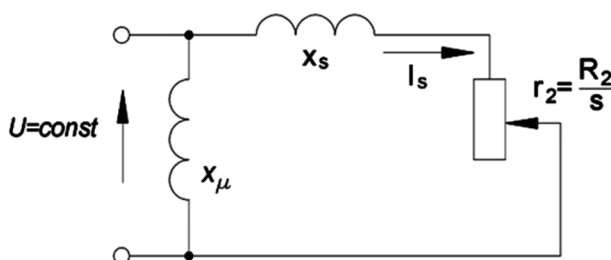


Рисунок 4 – Простейшая схема замещения асинхронного двигателя

Индуктивное сопротивление x_s в схеме представляет собой сумму индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора $x_s = x_1 + x_2$. Активная мощность P в этой схеме представляет мощность, получаемую двигателем из сети. Эта мощность, передаваемая со статора на ротор двигателя, определяется, как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного потока двигателя $P = \omega M$. Последняя при неизменной частоте сети остается постоянной при любом скольжении двигателя, и, следовательно, вращающий момент двигателя пропорционален мощности P , а в относительных единицах может быть принят численно ей равным ($P = M$).

Значение мощности P в схеме на рисунке 4 легко определяется в зависимости от скольжения двигателя:

$$P = I_s^2 r_2 = I_s^2 \frac{R_2}{s} = \frac{U^2 \frac{R_2}{s}}{\left(\sqrt{x_s^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}\right)^2} = \frac{U^2 R_2}{s \left(x_s^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2\right)} = \frac{U^2 R_2 s}{(s x_s)^2 + R_2^2}, \quad (12)$$

в результате:

$$P = \frac{U^2 R_2 s}{(s x_s)^2 + R_2^2}. \quad (13)$$

Максимум мощности двигателя или так называемый опрокидывающий момент достигается при критическом скольжении:

$$S_{кр} = \frac{R_2}{x_s} \quad (14)$$

и получается равным

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}. \quad (15)$$

Характеристика моментов проиллюстрирована рисунком 5

Подставляя (15) и (14) в (13), получим формулу для определения электромагнитной мощности (формула Клосса):

$$P = \frac{2P_m}{\frac{s}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{s}}. \quad (16)$$

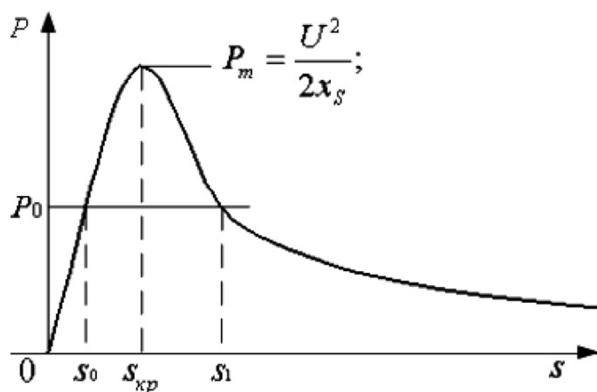


Рисунок 5 – Характеристика моментов

Практический критерий устойчивости. Рассмотрим поведения системы двигатель – нагрузка в точках а и b, где по условиям существования режима имеет место баланс электромагнитной и механической мощности и возможно существование установившегося режима (рис. 6).

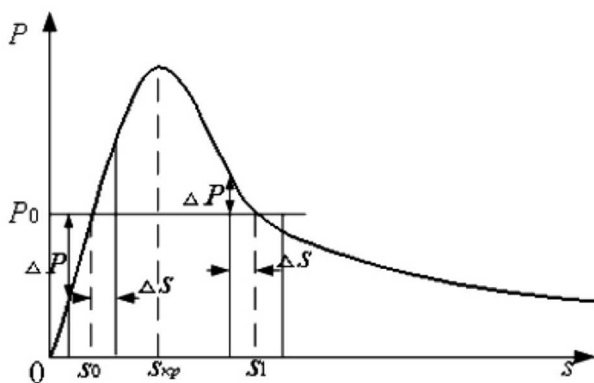


Рисунок 6 – Механическая характеристика АД

Рассмотрим режим в точке а:

- при увеличении скольжения s (торможение):

$$\Delta P = P_{эл.(s_1)} - P_0. \quad (17)$$

Результат положительный, вращающий момент больше механического (тормозного) момента, происходит ускорение и возврат в точку а, что соответствует устойчивой работе;

- при уменьшении скольжения s (ускорение):

$$\Delta P = P_{эл.(s_2)} - P_0. \quad (18)$$

Результат отрицательный, вращающий момент меньше механического (тормозного) момента, происходит торможение и возврат в точку а, то есть имеет место устойчивая работа.

Рассмотрим режим в точке b:

- при увеличении скольжения s :

$$\Delta P = P_{эл.(s_4)} - P_0. \quad (19)$$

Результат отрицательный, вращающийся момент меньше механического (тормозного) момента, происходит дальнейшее торможение и уход от точки b, то есть, имеет место неустойчивая работа;

- при уменьшении скольжения s :

$$\Delta P = P_{эл.(s_4)} - P_0. \quad (20)$$

Результат положительный, вращающийся момент больше механического (тормозного) момента, происходит разгон и переход в точку b , то есть, имеет место неустойчивая работа.

Определим производную мощности двигателя от скольжения в заданной точке:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta s} = \frac{dP}{ds} = \frac{d(P_3 - P_0)}{ds} = \frac{dP_{изб.}}{ds}. \quad (21)$$

Прямой или практический критерий устойчивости:

$$\frac{dP_{изб.}}{ds} > 0. \quad (22)$$

Для сохранения статической устойчивости асинхронной машины производная избыточной мощности по углу в точке баланса мощностей должна быть положительной.

Вторичные критерии устойчивости. Лавина напряжения

Определение параметров эквивалентного двигателя часто затруднительно, что заставляет искать другие решения, позволяющие подойти к оценке устойчивости асинхронных двигателей в электрических системах, не выделяя их из состава комплексной нагрузки. Это можно сделать по так называемым вторичным критериям устойчивости нагрузки.

Для узла нагрузки можно снять зависимости $P(U)$ и $Q(U)$.

Потребляемая двигателем реактивная мощность в соответствии со схемой замещения (рис. 7) состоит из двух слагаемых:

$$Q = Q_s + Q_\mu. \quad (23)$$

где Q_μ – мощность, потребляемая ветвью намагничивания, равная

$$Q_\mu = \frac{U_d^2}{x_\mu}, \quad (24)$$

Q_s – мощность, потребляемая ветвью рассеяния, равная

$$Q_s = (I_2')^2 x_s = \frac{U_d^2 x_s s^2}{r_s^2 + (x_s s)^2}; \quad (25)$$

I_2' – приведенный ток цепи рассеяния.

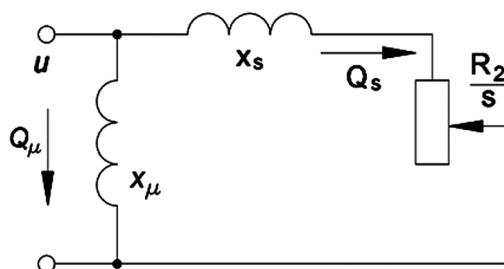


Рисунок 7 – Схема замещения асинхронного двигателя (АД)

Значения электромагнитной мощности двигателя в соответствии со схемой (рис. 7) определяются по формуле:

$$P_d = (I_2')^2 \frac{r_s}{s} = \frac{U_d^2 r_s s}{r_s^2 + (x_s s)^2}. \quad (26)$$

При постоянном механическом моменте (мощности) P_0 из (25) и (26) следует что $Q_s \equiv s$.

При изменении напряжения на двигателе в соответствии с рисунком 8 находятся значения скольжения, и строится зависимость $Q_s = f(U)$ (рис. 9).

Как следует из рисунка 9 зависимость $Q_s = f(U)$ с уменьшением U сначала тоже уменьшается, а затем растет. Следовательно, снижение U приводит к росту потребляемой реактивной мощности, а значит, и к росту тока. При питании от источника соизмеримой мощности это может привести к дальнейшему снижению напряжения на дви-

гатель U . Прогрессирующее снижение напряжения получило название лавины напряжения. При $U_{кр}$ когда $\frac{dQ}{dU} = -\infty$, происходит опрокидывание двигателя.

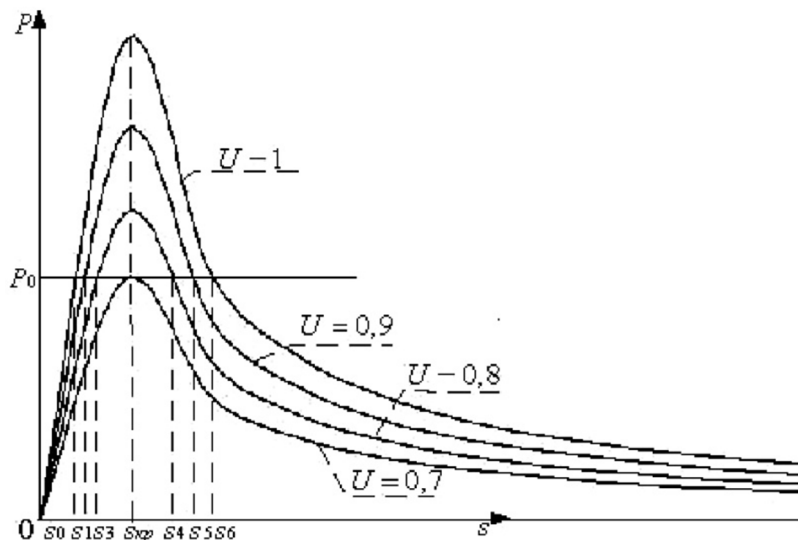


Рисунок 8 – Снижение напряжения на асинхронном двигателе

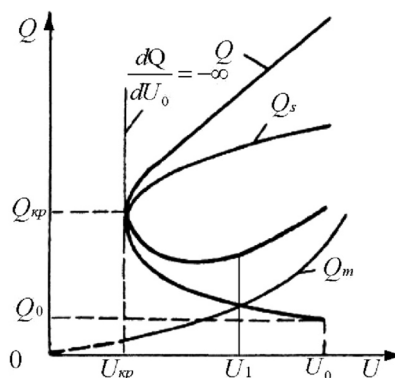


Рисунок 9 – Вторичный критерий устойчивости

В диапазоне $[1 \dots U_1]$ невозможна лавина напряжения, а в диапазоне $[U_1 \dots U_{кр}]$ возможна лавина напряжения. Следовательно, выражение

$$\frac{dQ}{dU} \rightarrow -\infty \tag{27}$$

может быть принято в качестве вторичного критерия статической устойчивости асинхронной нагрузки. Данный критерий не выявляет лавину напряжения.

Другим вторичным критерием является критерий Жданова, требующий знания статических характеристик узла нагрузки $P(U), Q(U)$.

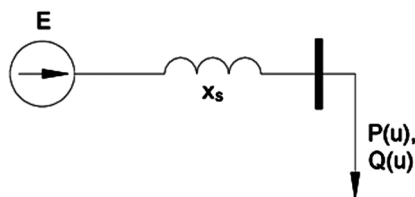


Рисунок 1.10 – Расчетная схема

Для расчетной схемы рисунка 10 можно построить зависимость $E(U)$ (рис. 11).

При $E = E_0$ равновесие установившегося режима возможно в точках а и б. В точке а производная $dE / dU > 0$, что на характеристике мощности АД соответствует устойчивому режиму.

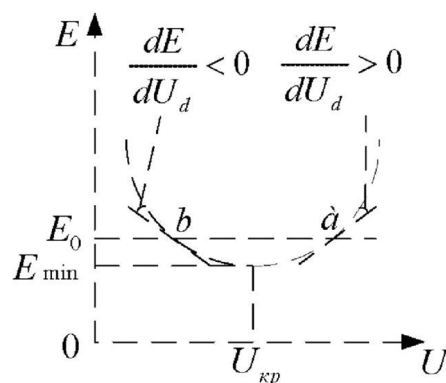


Рисунок 11 – Критерий Жданова

С утяжелением режима по переменной U каждой точке кривой $E(U)$ соответствует увеличивающееся скольжение. При критическом значении скольжения имеет место критическое напряжение $U_{кр}$. Точка b , где производная $dE / dU < 0$, соответствует по характеристике мощности неустойчивому равновесию.

Следовательно, знак производной dE / dU позволяет судить об устойчивости системы. Критерий устойчивости:

$$\frac{dE}{dU_d} > 0 \quad (28)$$

впервые был предложен проф. П.С. Ждановым и называется критерием устойчивости Жданова.

Следует отметить, что критическое напряжение $U_{кр}(E)$, определенное по критерию Жданова, получается немного выше, чем критическое напряжение $U_{кр}(s)$, полученное по критерию $dP / ds = 0$, т.е. при выполнении условия (28) скольжение двигателя еще не достигает $s_{кр}$. По критерию Жданова определяется напряжение, которое предшествует образованию лавины напряжения.

С учетом вышеизложенного был произведен анализ статической устойчивости завода электросталей. В качестве объекта исследования был взят распределительный пункт РП-2 цехов сталеплавильных печей №№ 1 и 2. В результате расчетов были получены статические характеристики данного узла нагрузки для различных значений емкости компенсирующего устройства.

В целом расчеты показали, что данный узел обладает достаточно высоким запасом статической устойчивости. Также расчеты подтвердили отрицательное влияние емкости на статическую устойчивость узла нагрузки.

Аналогично была проанализирована статическая устойчивость узла нагрузки агломерационной фабрики металлургического комбината по вышеизложенной методике. Результаты анализа показали результаты, аналогичные заводу электросталей.

Литература

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоиздат, 1990. – 390 с.
2. Хрущев Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 160 с.
3. Эрнст А.Д. Электромеханические переходные процессы в электрических системах: Курс лекций. – Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2013. – 130 с.

References

1. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. Calculations of Stability and Emergency Automation in Power Systems. – M.: Energoizdat, 1990. – 390 p.
2. Khrushchev Yu.V., Zapodovnikov, K.I., Yushkov, A.Yu. Electromechanical transients in the electrical power systems: tutorial // Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publisher, 2012. – 160 p.
3. Ernst A.D. Electromechanical Transients in Electrical Systems: Lecture Course. – Nizhnevartovsk: Publishing house of NVSU, 2013. – 130 p.