



## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УГЛА РОТОРА ДЛЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СИРИИ

А. Альзаккар<sup>1</sup>, Н.П. Местников<sup>2</sup>, Ф. Алхадж Хассан<sup>1</sup>, И. М. Валеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, [Ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:Ahmadalzakkar86@gmail.com)<sup>1</sup>

**Резюме:** Статья посвящена исследованию и анализу значений взаимосвязей между электроэнергетическими системами стран Ближнего Востока, которые увеличиваются при большей вероятности вследствие зависимости всех стран от потребления электроэнергии и простоте ее передачи в целях получения технико-экономических выгод. **ЦЕЛЬ.** В данном исследовании проанализировано динамическое влияние межсетевой связи на стабильность схемы для синхронных генераторов в электрических сетях Сирии. Кроме того, авторами статьи в рамках исследования проанализировано динамическое влияние взаимодействия на устойчивость угла вращения ротора синхронных генераторов, эксплуатируемые в электроэнергетической системе Сирии, посредством использования динамического моделирования энергетической системы страны. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования авторами использовалась методика на основе динамического представления энергосистемы и построения ее нелинейных уравнений с последующим использованием программы PSS<sup>®</sup> E. Авторами статьи использовалась вышеуказанная программа (моделирование энергетической системы) в целях определения детерминанта системы и определения времени устранения критических неисправностей трехфазных отказов при классе напряжения 230-400 кВ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Авторами статьи получены решение и определение параметров системы и времени разделения границ трехфазных коротких замыканий в сети напряжением 400 кВ в дополнение к определению углового положения цепей генератора и таким образом, произведена проверка его стабильности, независимо от того, что работает ли он независимо в электроэнергетической системе Сирии или является частью сети. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В ходе исследования авторами получены следующие выводы, такие как: обнаружено увеличение CFCT для блоков генерации в электроэнергетической системе Сирии вследствие активации соединения, увеличения переданной мощности, что приводит к увеличению зоны стабилизации после отказа и перед началом подключения электрических систем к электроэнергетической системе страны, а также необходимо проведение углубленных динамических исследований всей системы в целях представления влияния соединения на параметры системы с учетом увеличения мощности.

**Ключевые слова:** соединение электрических сетей; линия электропередачи; передаваемая мощность; стабильность; угол вращения ротора.

**Благодарности:** статья выполнена во исполнение обязательств Гранта СВФУ им. М.К. Аммосова на публикацию научно-исследовательских статей от 12.2020 года.

**Для цитирования:** Альзаккар А., Местников Н.П., Алхадж Хассан Ф., Валеев И.М. Анализ динамического воздействия электрического соединения на устойчивость угла ротора для синхронных генераторов в электроэнергетической системе Сирии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 120-133. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-120-133.

## ANALYSIS OF THE DYNAMIC EFFECT OF THE ELECTRICAL INTERCONNECTION ON THE STABILITY OF THE ROTOR ANGLE FOR SYNCHRONOUS GENERATORS IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF SYRIA

Ahmad Alzakkar<sup>1</sup>, MestnikovNP<sup>2</sup>, Fouad Alhajj Hassan<sup>1</sup>, Valeev I. M<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, [Ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:Ahmadalzakkar86@gmail.com)<sup>1</sup>

**Abstract:** This article focuses on the study and analysis of the importance of interconnections between electricity systems, which increases with greater probability due to the dependence of all countries and States on electricity and the ease of its transfer between countries in order to supplement their economic and technical benefits. **THE PURPOSE.** This study analyzes the dynamic impact of interconnection on circuit stability for synchronous generators in Syrian power grids. In addition, the authors of the article analyzed the dynamic effect of interaction on the stability of the angle of rotation of the rotor of synchronous generators operated in the Syrian power system through the use of dynamic modeling of the country's power system. **METHODS.** In the course of the study, the authors used a technique based on the dynamic representation of the power system and the construction of its nonlinear equations, followed by the use of the PSS<sup>®</sup> E program. 230-400 kV. **RESULTS.** The authors of the article obtained a solution and determination of the system parameters and the separation time of the boundaries of three-phase short circuits in a 400 kV network in addition to determining the angular position of the generator circuits, and thus, its stability was checked, regardless of whether it works independently in the electric power system of Syria or is part of a network. **CONCLUSION.** In the course of the study, the authors obtained the following conclusions, such as: an increase in CFCT was found for generating units in the power system of Syria due to connection activation, an increase in transmitted power, which leads to an increase in the stabilization zone after a failure and before the start of connecting electrical systems to the country's power system, as well as it is necessary to conduct in-depth dynamic studies of the entire system in order to represent the effect of the connection on the parameters of the system, taking into account the increase in power.

**Key words:** Electrical Interconnection; transmission lines; power transposed; stability; rotor angle.

**Acknowledgments:** this article was fulfilled in fulfillment of the obligations of the Grant of SVFU named after M.K. Ammosov to publish research articles of 12.2020.

**For citation:** Ahmad Alzakkar, Mestnikov NP, Fouad Alhaji Hassan, Valeev I.M. Analysis of the dynamic effect of the electrical interconnection on the stability of the rotor angle for synchronous generators in the electric power system of Syria. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(4):120-133. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-120-133.

### **Введение**

Статья посвящена проблеме устойчивости работы электроэнергетических систем арабских стран Ближнего Востока с обязательным соблюдением параметров синхронной работы генераторов в том числе в соответствии показателями качества электроэнергии. В статье приводятся различные типы устойчивости электроэнергетических систем, которые классифицируются по основным параметрам, такие как: угол вращения ротора генератора, показатель напряжения шины и частота электрической системы [1].

Помимо этого, динамика энергетической системы характеризуется основными особенностями, а именно [2], [3]:

1. Синхронная связь представляет типичное поведение, заключающееся в том, что по мере постепенного увеличения передачи мощности достигается максимальный предел нагрузки сети, за которым система не может оставаться в синхронном режиме, вследствие которой происходит выход за пределы шага.

2. Любая электроэнергетическая система представляет собой в основном пружинно-инерционную колебательную систему с инерцией на механической стороне и пружинным действием, обеспечиваемым синхронной связью, при этом передача мощности пропорциональна показателю  $\sin \delta$  или  $\delta$  (для малых  $\delta$  является относительным внутренним углом для электрических машин).

3. Передаваемая мощность пропорциональна показателю  $\sin \delta$ , где уравнение, определяющее динамику системы, является нелинейным для возмущений, вызывающие большие изменения угла  $\delta$ .

**Материалы и методы. Формирование математической модели**

В общем случае математическая модель любой электроэнергетической системы включает в себе базовые элементы данной системы, а именно: системы обмотки возбуждения, различные генераторы мощности, линии электропередачи, силовые трансформаторы, показатель нагрузки электрической сети и т.д.

В последующем изложении авторами статьи рассматриваются конкретные параметры базовых элементов электроэнергетической системы.

**А- Системы обмотки возбуждения:**

Данный элемент классифицируется по трем категориям по источнику энергии возбуждения [4], а именно: системы возбуждения постоянного тока, системы возбуждения переменного тока и статические системы возбуждения.

В этой связи существуют различные типы систем возбуждения, но в электроэнергетической системе Сирии система возбуждения представлена одной моделью типа (*Simplified Excitation System*). Выбор данного математического моделирования обусловлен тем, что существуют три аналогичных моделирования, но две из них являются нецелесообразными ввиду высокой степени проработанности и наличия большого количества научно-технической литературы. Далее на рисунке 1 представлена блок-схема упрощенной системы возбудителя.

Важно отметить, что модель *SEXS* представляет собой не конкретный тип системы возбуждения, а, предварительно, общие характеристики широкого спектра правильно настроенных систем возбуждения.

Кроме того, модель *SEXS* особенно полезна в определенных случаях, где должна быть представлена система возбуждения в условиях неизвестности детальной конструкции элементам [5–7].

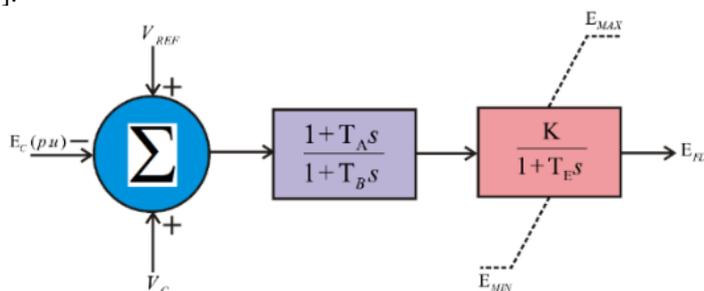


Рис. 1. Блок-схема упрощенной системы возбуждения на программе PSS/E Fig. 1. Block diagram of the simplified excitation system on the PSS/E program

где  $K$  – усилитель,  $E_{MIN}$ ,  $E_{MAX}$  – базовые показатели источника возбуждения,  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_E$  – временные константы, обеспечивающие временное уменьшение усиления, необходимое для обеспечения удовлетворительного динамического поведения при высоком стационарном усилении

Далее перейдем к модели *SEXS*, которая является наиболее распространенной моделью системы возбуждения, используемой для проведения анализа и получения напряжения основного поля генератора  $E_{FD}$ . В соответствии с источником [7], предоставленные от Министерства электроэнергетики Сирийской Арабской Республики, параметры модели систем возбуждения типа *SEXS* на таблице 1 представлены следующим образом:

Таблица 1

Параметры систем возбуждения типа <i>SEXS</i>					
$K$	$T_B$	$T_A/T_B$	$E_{MIN}$	$E_{MAX}$	$T_E$
[20-100]	[5-20]	[0.05-1]	0	[3-6]	[0-0.5]

**В- Генераторы:**

Авторами статьи используются генераторы *B* моделей *GENRSA* и *GENROE*.

Модель генератора представлена в виде блока основных полюсов – модель *PSS @ E GENSAE*, показанная на блок-схеме на рисунке 2. Данная динамическая модель имеет 5-й порядок с функцией насыщения, представленная как геометрическая (экспоненциальная) функция [9].

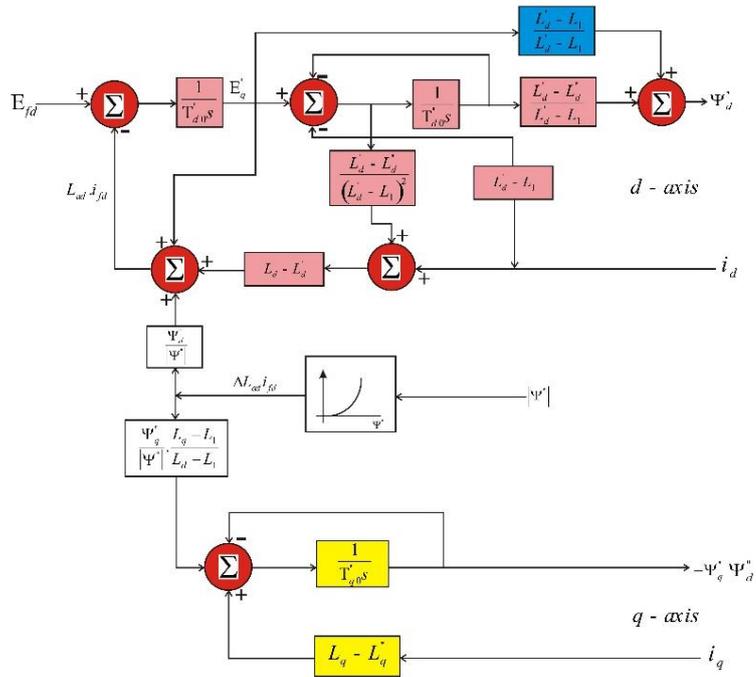


Рис. 2. Блок-схема для модели PSS/E генератора типа GENSAE - Явный полюс *Fig. 2. Block diagram for the GENSAE type generator PSS/E model-An explicit pole*

В то же время модель генератора для круглороторного блока представлена в виде модели PSS @ E GENROE, показанная на рисунке 3 в качестве блок-схемы. Данная динамическая модель 6-го порядка с функцией насыщения представлена, как геометрически-экспоненциальная функция [9].

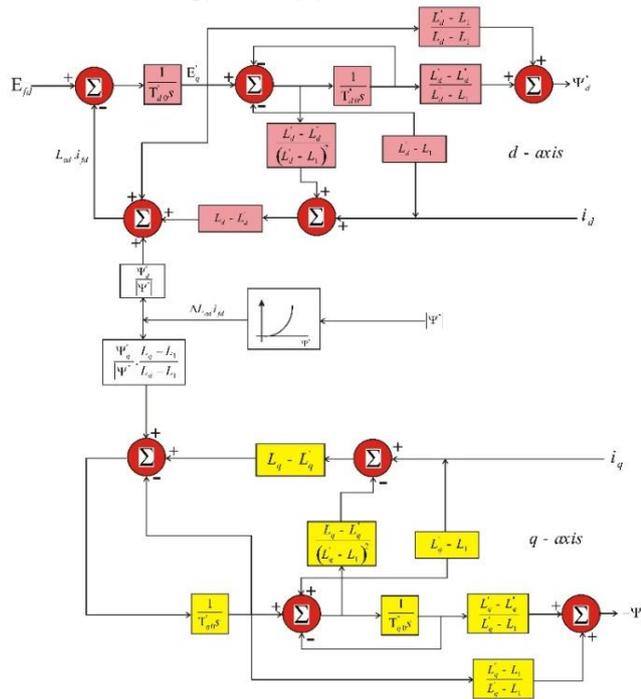


Рис. 3. Блок-схема модели PSS/E генератора типа GENROE для круглого ротора *Fig. 3. Block diagram of the PSS / E model of a GENROE-type generator for a round rotor*

**В- Линии электропередачи:**

В общем электроэнергия может распределяться в электрическую сеть посредством использования переменного или постоянного тока. Системами питания, используемые в данной части, используются технология передачи переменного тока, схема замещения которой представлена на рисунке 4 Также системой PSS @ E используется модель для представления линии электропередачи, называемая π - эквивалентом [8],[9].

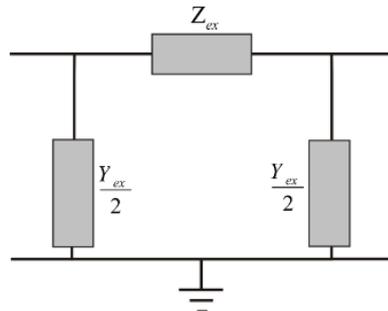


Рис. 4. П – образная схема замещения линии электропередачи *Fig. 4. U-shaped replacement circuit of the power transmission line*

*Г-Трансформатор:*

В настоящий момент в электроэнергетической системе Сирии эксплуатируются в основном двух- и трех- обмоточные силовые трансформаторы, где на рисунке 5 представлена схема замещения двух- обмоточного силового трансформатора.

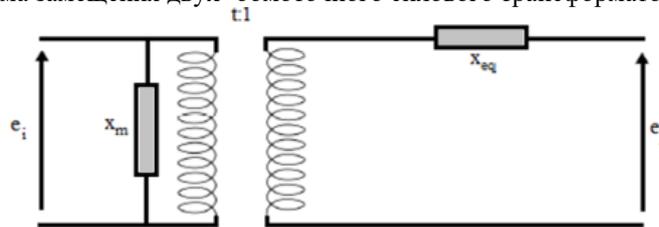


Рис. 5. Схема замещения двух- обмоточного силового трансформатора с переключением отводов

Кроме того, в моделировании на лицензированной программе *PSS® E* напряжение на вводах и выводах трансформатора, где параметры  $e^i$  и  $e^j$  являются зависимыми от следующих показателей:  $X_m$  – намагничивающие реактанты.  $X_{eq}$  – эквивалентное реактивное сопротивление.

В этой связи на рисунке 6 представлена более упрощенная схема замещения трех- обмоточного трансформатора.

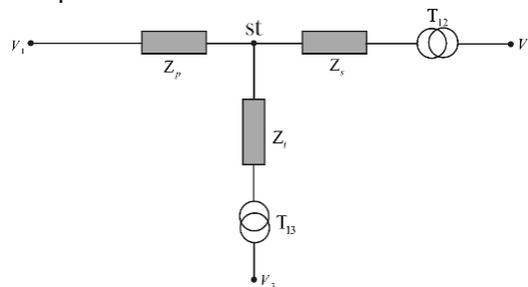


Рис. 6. Схема замещения трех- обмоточного силового трансформатора *Fig. 6. Replacement circuit of a three-winding power transformer*

*Д- Нагрузки:*

Моделирования нагрузки сети различаются по определенным параметрам, такие как: сила тока, активная и реактивная мощности и зависимости данных параметров от частоты шин, в соответствии с закономерностями [10]:

$$\left. \begin{aligned} I_p + jI_q &= \left( I_{p0} + jI_{q0} \right) \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^k \\ P &= P_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^m \\ Q &= Q_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Помимо этого, основные параметры моделирования нагрузки сети являются зависимы от следующих показателей:

$I_p$  – действительная часть нагрузки сети.

$I_q$  – мнимая часть нагрузки сети.

$I_{p0}$  – действительная часть нагрузки сети при опорном значении напряжения и частоты.

$I_{q0}$  – мнимая часть нагрузки сети при опорном значении напряжения и частоты.

$k, m, n$  – константы, зависящие от опорного значения напряжения и частоты.

В статье авторами будет принято упрощенное представление системы электроснабжения, известная как классическая модель [11–13]. Однако имеются следующие допущения, такие как: игнорирование демпфирования, постоянность механической мощности, синхронные машины моделируются, как источники постоянного напряжения за переходным реактивным сопротивлением, совпадение между механическим углом поворота ротора каждой машины и напряжением за реактивным сопротивлением машины, нагрузки представлены в виде импедансов, а именно допусками.

В этой связи, исходя из вышеуказанных допущений, уравнения качания системы электропитания, содержащей  $m$  узлов и  $n$  шин, будут выведены, как на рисунке 7 [12]:

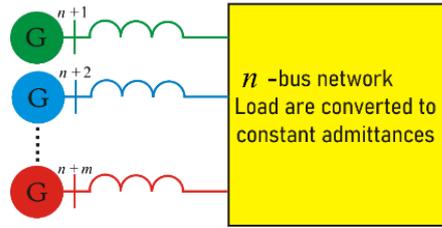


Рис. 7. Представление энергетической системы в целях анализа стабильности переходных процессов (многомашинный).

Fig. 7. Representation of the energy system in order to analyze the stability of transient processes (multi-machine).

Далее в целях исследования устойчивости энергетической системы необходимо выполнение некоторых предварительных расчетов, такие как:

1. Предположение, что база электропитания имеет показатель  $S_{base} = 100$  МВА.
2. Значение токов машины до возмущения рассчитываются из следующих закономерностей.

$$\left. \begin{aligned} I_i &= \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \\ i &= n+1, \dots, n+m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $V_i$  – величина напряжения в узле  $i$ ;  $P_i$  – суммарная активная мощность в узле  $i$ ;  $Q_i$  – суммарная реактивная мощность в узле  $i$ .

Сопротивления якоря генератора обычно пренебрегаются и затем выводится величина напряжения за переходным реактивным сопротивлением:

$$E_i' = V_i + jX_d' I_i \quad (3)$$

3. Все нагрузки преобразуются в эквивалентные допуски с помощью уравнения.

$$Y_{i0} = \frac{S_i^*}{|V_i|^2} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2} \quad (4)$$

4. Уравнение напряжения узла с узлом 0 в качестве эталона для этой сети.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus0} \quad (5)$$

где  $I_{bus}$  – вектор инжектируемых токов шины,  $V_{bus0}$  – вектор напряжений шины, измеренных от опорного узла.

5. Из [12] находим следующее:

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^m |E_i'| |E_j'| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (6)$$

Уравнение качания с пренебрегаемым демпфированием, для машины  $i$  становится:

$$P_{mi} = \frac{H_i}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + \sum_{j=1}^m |E_i'| |E_j'| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

где  $Y_{ij}$  – элементы неисправной матрицы пониженного допуска шины,  $H_i$  – постоянная инерции машины  $i$ , выраженная на общей базе MVA.

Далее, как правило, вводятся переменные состояния, чтобы преобразовать каждое уравнение качания второго порядка двумя связанными дифференциальными уравнениями первого порядка.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \Delta\omega_i \\ \frac{d\Delta\omega_i}{dt} &= \frac{\pi f_0}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}^f) \\ i &= 1+n, \dots, n+m \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В большинстве случаев один из генераторов используется в качестве опорного, и разность фазовых углов строится для всех генераторов на основе данного опорного сигнала. Если разности фазовых углов не увеличиваются, то сообщается, что система стабильна, но если эти разности увеличиваются, то сообщается, что система не стабильна.

#### Динамическое представление электроэнергетической системы Сирии

Следует добавить, что необходимые для расчета данные [14] будут предоставлены со стороны Министерства электроэнергетики Сирии о характеристиках работы электростанции, линии электропередачи нагрузки в качестве входных данных для программы PSS®E [15] в качестве файлов формата raw [16]. В качестве примера на рисунке 8 представлена однолинейная схема электрической сети в Сирии напряжением 230-400 кВ.

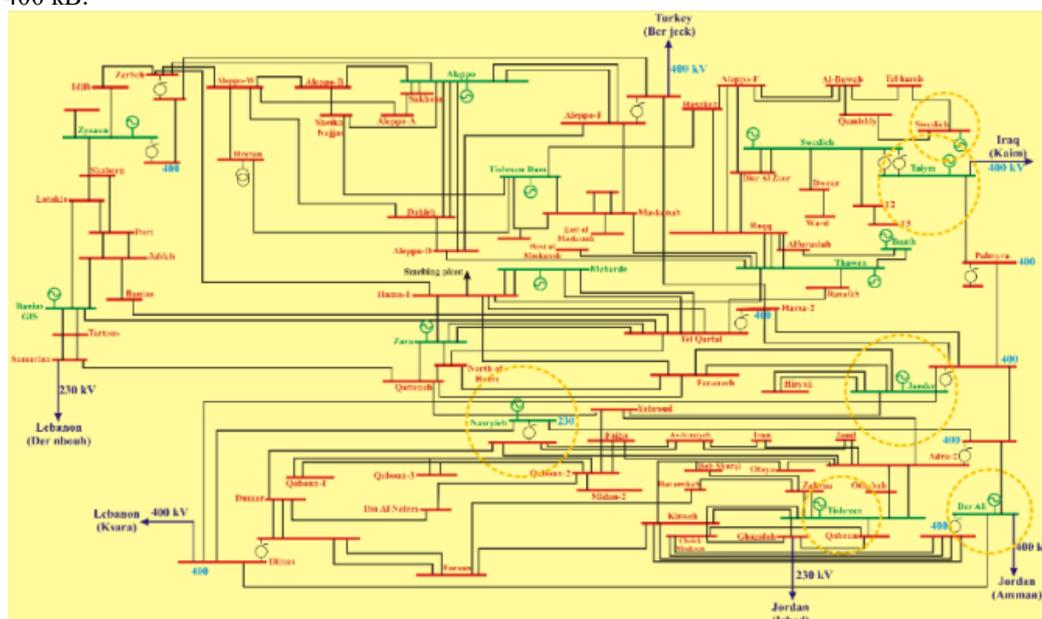


Рис. 8. Однолинейная схема электрической сети в Сирии Fig. 8. One-line diagram of the electrical network in Syria

Обратим внимание на то, что динамическое представление сирийской электрической системы для трехфазного короткого замыкания будет изучено на подстанциях с изменением времени устранения неисправностей в диапазоне (100-600) мс и определением времени устранения критических неисправностей CFCT, а именно Critical Fault Clearing Time [17], [18] для всех установок в сирийской электрической системе при напряжениях 230 кВ и 400 кВ «до» и «после» присоединения. Далее будут допущены некоторые неисправности в сирийской электрической системе и в некоторых электрических системах стран присоединения, такие как: трехфазное короткое замыкание при отключении шины 400 кВ, отключение некоторых линий электропередачи, неожиданный выход из строя для генерирующих блоков.

#### Проект создания единой арабской электроэнергетической системы

Авторами статьи учитывается проект [19],[20],[21],[22] который предусматривает соединение электрических сетей Египта, Ирака, Иордании, Ливии, Ливана, Палестины, Сирии и Турции, называемое ЕИИЛЛПСТ (расширенно: Египет-Ирак-Иордания-Ливан-Ливия-Палестина-Сирия-Турция) представлена на рисунке 9.

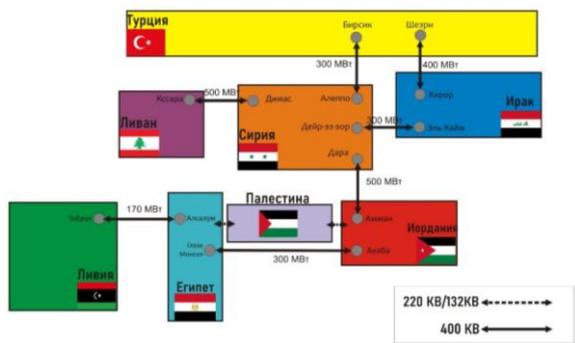


Рис. 9. Проект ЕИИЛЛПСТ

Fig. 9. The EILLPST project

Обратим внимание на то, что электрические сети между этими странами соединены между собой с напряжениями 500, 400 и 220 кВ и, прежде всего, в дополнение к подводному кабелю длиной 13 км с напряжением 400 кВ, сеть соединяет электростанцию Аль-Акаба в Иордании и электростанцию Таба в Египте.

*Определение времени устранения критических неисправностей в Сирийской энергосистеме*

Одновременно наряду с вышеуказанными параметрами определяется, что время устранения критических неисправностей *CFCT* является критическим временем или максимальным временем, необходимого для синхронного генератора в целях поддержания синхронизма в состоянии самого генератора. Далее принцип, используемый при определении *CFCT*, заключается в том, что при наложении трехфазного короткого замыкания на шине, и отказ был отключен после *Xмс*, процесс повторялся с новым временем отказа до того момента, где не получается *CFCT* в соответствии с таблицами 2 и 3.

Таблица 2

Время устранения критических неисправностей трехфазного короткого замыкания для некоторых электростанций до присоединения

ШИНА		Электростанция	CFCT (мс)
№	Название шины		
55599	NASRG01 15.0	Nasryieh 230	200
55607	JANDGT01 15.0	Jander 230	200
55639	TAYHGT01 10.5	Taiym 230	200
55836	DIRALIGT01 20.0	Der Ali 400	400
55837	DIRALIGT02 20.0		
55579	SWDPT01 10.5	Swedieh 230	200
55589	TISHGT01 15.0	Tishreen 230	200

Таблица 3

Время устранения критических неисправностей трехфазного короткого замыкания для некоторых электростанций после соединения

ШИНА		Электростанция	CFCT (мс)
№,	Название шины		
55599	NASRG01 15.0	Nasryieh 230	250
55607	JANDGT01 15.0	Jander 230	200
55639	TAYHGT01 10.5	Taiym 230	200
55836	DIRALIGT01 20.0	Der Ali 400	500
55837	DIRALIGT02 20.0		
55579	SWDPT01 10.5	Swedieh 230	200
55589	TISHGT01 15.0	Tishreen 230	200

*Проверка устойчивости генератора и график кривых угла ротора*

Далее в целях установления достоверности расчетных данных авторами статьи представлены материалы о проверочных вычислениях в рамках определенных элементов электроэнергетической системы.

*Ситуация-1:* На рисунке 10 представлена угловая кривая ротора блока генерации электростанции Nasryieh (NASRG01) перед соединением с ЕИИЛЛПСТ. При возникновении трехфазного короткого замыкания (Зфс) на шине 55599 электростанции Nasryieh. Далее представлен параметр различных времен отказа  $FT = 100-200-250$  мс. Из графика по синей

кривой видно, что силовая установка *Nasryieh* внефазная синхронизация *OOPS* имеется, что для  $FT = 250$  мс, следовательно,  $CFCT = 200$  мс.

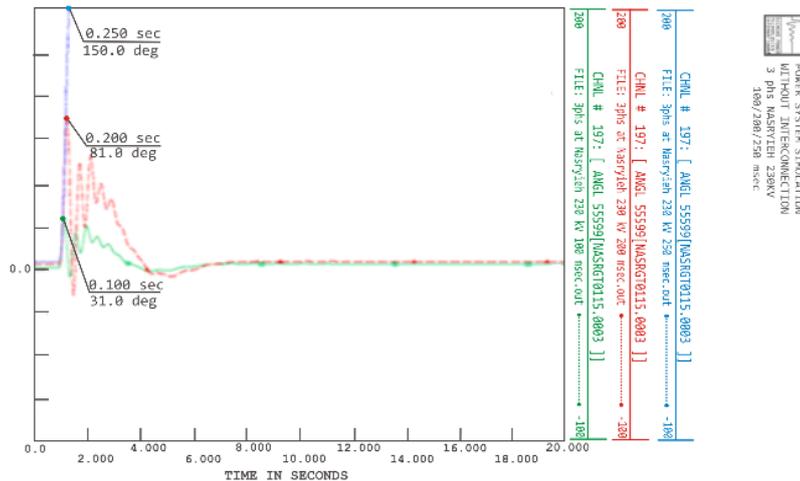


Рис. 10. Угол поворота ротора силовой установки *Nasryieh* для различных  $FT$  перед присоединением *Fig. 10. Rotation angle of the Nasryieh power plant rotor for various FT before connection*

*Ситуация-2:* На рисунке 11 представлена угловая кривая ротора блока формирования *Nasryieh* (*NASRG01*) после соединения с *ЕИИЛЛПСТ*. При возникновении трехфазного короткого замыкания 3фс на шине 55599 электростанции *Nasryieh*. Для различных времен отказа  $FT = 100-200-300$  мс. Из графика (синяя кривая) видно, что силовая установка *Nasryieh* внефазная синхронизация *OOPS* для  $FT = 300$  мс, следовательно,  $CFCT = 250$  мс.

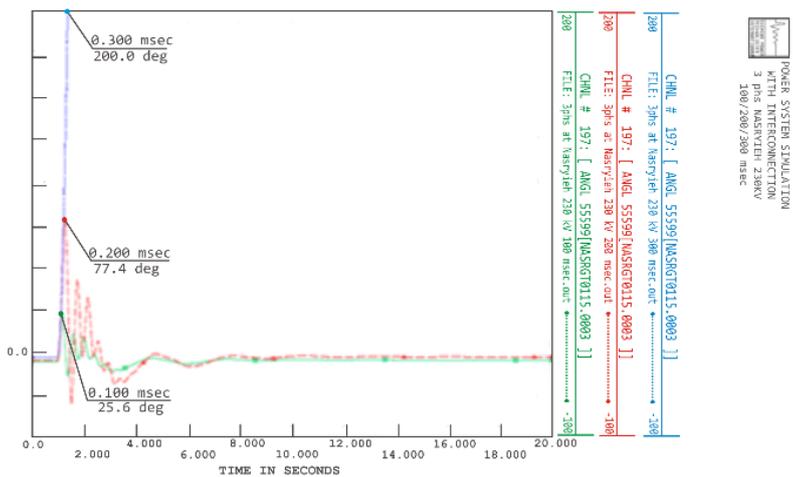


Рис. 11. Угол поворота ротора силовой установки *Nasryieh* для различных  $FT$  после соединения *Fig. 11. Rotation angle of the Nasryieh power plant rotor for various FT after connection*

Сравнивая рисунки 10 и 11, отмечается улучшение  $CFCT$  для 3 ч электростанции в *Nasryieh* после соединения с *ЕИИЛЛПСТ* от 200 до 250 мс.

*Ситуация-3:* На рисунке 12 представлена угловая кривая ротора генерирующих блоков электростанций *Jander- Taiym- Der Ali- Swedieh* перед соединением с *ЕИИЛЛПСТ*. При возникновении трехфазного короткого замыкания 3фс на шине 55579 силовой установки *Swedieh*. Для времени отказа  $FT = 200$  мс. Из графика по зеленой кривой заметно, что силовая установка *Swedieh* не синхронизирована *OOPS*.

*Ситуация-4:* На рисунке 13 представлена угловая кривая ротора генерирующих блоков электростанций *Jander- Taiym- Der Ali- Swedieh* после соединения с *ЕИИЛЛПСТ* и передачи мощности в количестве 700 МВт. При возникновении трехфазного короткого замыкания 3фс на шине 55579 силовой установки *Swedieh*. Для времени отказа  $FT = 200$  мс. Из графика по зеленой кривой заметно колебание единичной генерации *Swedieh* и вернулось в их нормальное состояние после применения отказа *Stable* и указывается на роль межсоединений в восстановлении стабильности после отказов.

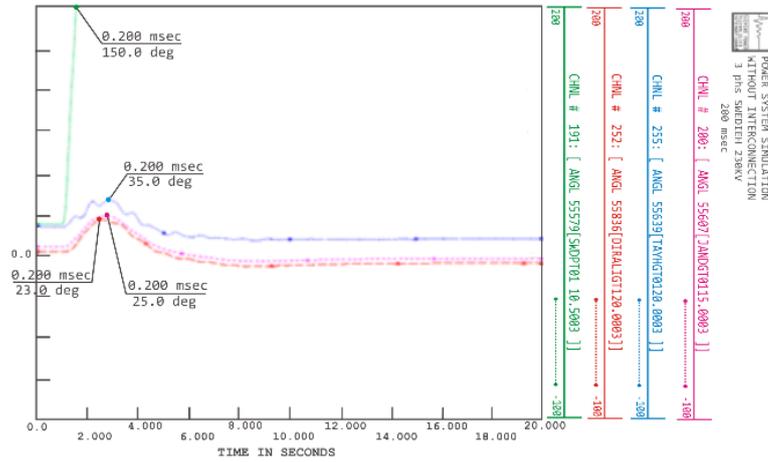


Рис. 12. Угол поворота ротора силовой установки Jander- Taiym- Der Ali- Swedieh FT = 200 мс перед присоединением

Fig. 12. Rotation angle of the rotor of the power plant Jander-Taiym-Dar Ali-Swedieh FT = 200 ms before connection

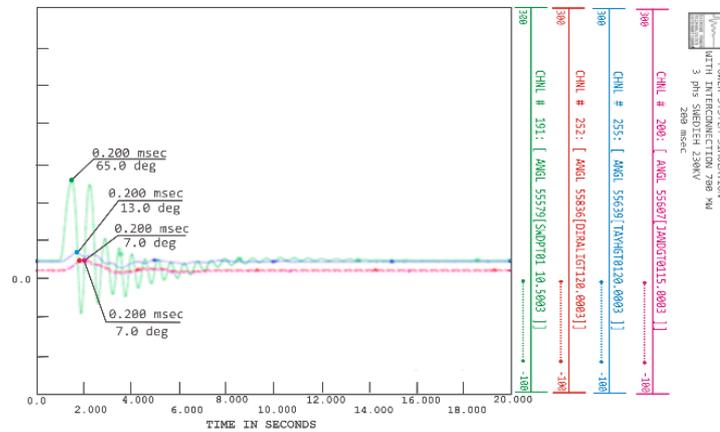


Рис. 13. Угол поворота ротора силовой установки Jander- Taiym- Der Ali- Swedieh (FT = 200 мс) после соединения

Fig. 13. Rotation angle of the rotor of the power plant Jander-Taiym-Dar Ali-Swedieh (FT = 200 ms) after connection

*Ситуация-5:* На рисунке 14 представлена угловая кривая ротора генерирующего блока *Der Ali (DIRALIGT01)*, перед соединением по красной кривой и после соединения по зеленой кривой с *ЕИИЛЛПСТ*. При возникновении трехфазного короткого замыкания (Зфс) на шине 55836 электростанции *Der Ali* и отключении линии электропередачи *Der Ali-North of Jordan* с напряжением 400 кВ. Время отказа составит  $FT = 200$  мс. Передаваемая мощность составит  $PT = 300$  МВт. Из графика (красная кривая) видно, что генерирующий блок *Der Ali (DIRALIGT01)* внефазной синхронизации *OOPS* вследствие того, что имеются: значительный дисбаланс мощности в отказавшем узле, малая генерируемая электрическая мощность, падение напряжения, которое становится приблизительно равным нулю в отказавшем узле), что приводит к ускорению генератора в период отказа, уменьшению мощности, поступающей от соединительной линии в результате отключения. Данное явление показывает положительное влияние межсоединений на стабильность угла *DIRALIGT01*.

*Ситуация-6:* На рисунке 15 представлена угловая кривая ротора генерирующего блока *Der Ali (DIRALIGT01)*, перед соединением (синяя кривая) и после соединения (красная и зеленая кривая) с *ЕИИЛЛПСТ*. При возникновении трехфазного короткого замыкания (Зфс) на шине 55836 электростанции *Der Ali*. Для времени отказа ( $FT$ ) = 200 мс. Пересечение мощности:  $PT1, PT2 = 300$  МВт, красная кривая, 700 МВт, зеленая кривая.

Также заметно по сюжету, что при увеличении мощности и ее передачи происходит явное улучшение угла поворота ротора *GT01* и хотя сеть межсоединений способствует питанию отказавшего узла и повышению мощности короткого замыкания и надежности шины, что приводит к увеличению зоны стабилизации после отказа.

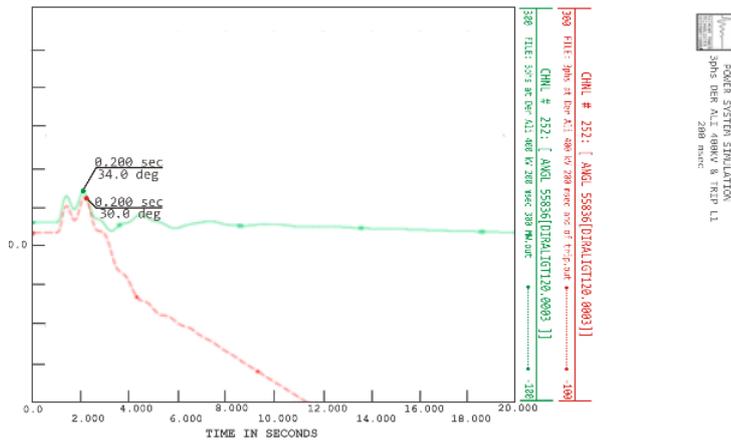


Рис. 14. Угол ротора *DIRALIGT01*,  $FT = 200$  мс,  $PT = 300$  МВт до и после соединения

Fig. 14. Rotor angle *DIRALIGT01*,  $FT = 200$  ms,  $PT = 300$  MW before and after connection

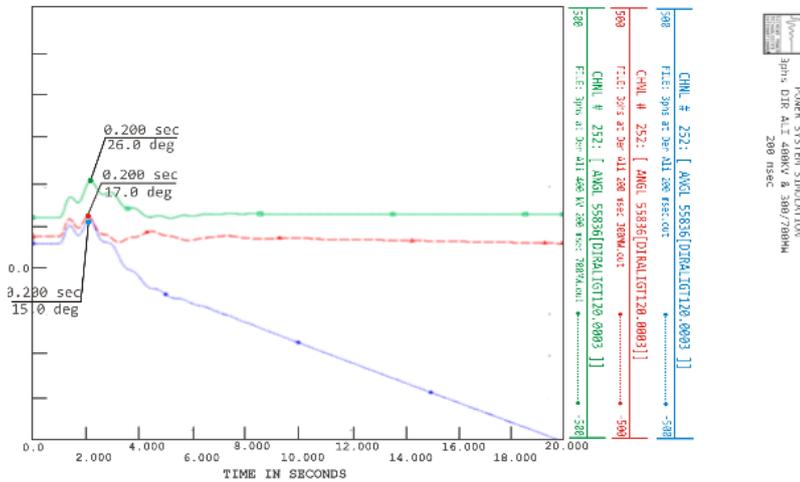


Рис. 15. Угол ротора *DIRALIGT01*,  $FT = 200$  мс,  $PT = 300$  и  $700$  МВт до и после соединения

Fig. 15. Rotor angle *DIRALIGT01*,  $FT = 200$  ms,  $PT = 300$  and  $700$  MW before and after connection

*Ситуация-7:* На рисунке 16 представлена угловая кривая ротора генерирующего блока *Der Ali* (*DIRALIGT01*) после соединения с *ЕИИЛПСТ*. При возникновении трехфазного короткого замыкания 3фс на шине 55836 электростанции *Der Ali*. Время отказа составит  $FT = 200$  мс. Также передаваемая мощность составит  $PT = 700$  МВт. Затем повторение того же отказа, но с падением блока генерации *KURM1-600* МВт. Заметно по сюжету красной кривой колебание *GT01* и не возвращается в их нормальное состояние после применения отказа и выпадает из строя из-за отсутствия синхронизации между электромагнитными и механическими моментами в результате негативного воздействия внезапного падения *KURM1*.

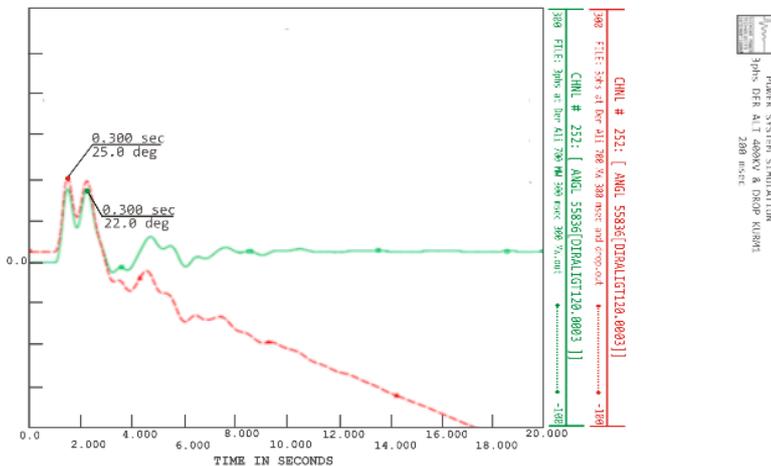


Рис. 16. Угол ротора *DIRALIGT01*,  $FT = 300$  мс,  $PT = 700$  МВт, перепад *KURM1* после соединения

Fig. 16. Rotor angle *DIRALIGT01*,  $FT = 300$  ms,  $PT = 700$  MW, *KORM 1* drop after connection

### Заключение

В ходе проработки данной научно-исследовательской работы авторами статьи получены следующие выводы:

1. Обнаружено, что наблюдается увеличение  $CFCT$  для блоков генерации в Сирийской электрической системе вследствие активации соединения, увеличения мощности, переданной  $CT$ , что приводит к увеличению зоны стабилизации после отказа.

2. Обнаружено, что неисправности, которые возникают в одной из электрических систем Египта, участвующих в сети соединения, могут негативно повлиять на переходную стабильность других электрических систем.

3. Перед началом подключения электрических систем к Сирийской электроэнергетической системе, необходимо проведение углубленных динамических исследований всей системы в целях представления влияние соединения на параметры системы и с учетом увеличения переданной мощности и выбора соответствующих защит для соединительных линий.

### Литература

1. Стогов А.Ю., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам // ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21, № 1-2. С. 56–66.

2. Валеев И.М., Альзакар А.М-Н. Гармоники и их Влияние при Определении Метода Компенсации Реактивной Мощности в Электрических Сетях // Вестник Казанского технологического университета. 2020. Т. 12 № 1 (45). С. 24-39.

3. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутриводского электроснабжения // ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22, № 2. С. 65–74.

4. Цегайе С., Фанте А. «нализ систем возбуждения синхронных машин: сравнительное исследование. Международный журнал энергетики и энергетика. 2016. Т. 10.

5. Мохамад А., Хашим Н и Хамза Н. Анализ устойчивости энергосистемы Саравака с использованием симулятора энергосистемы для проектирования (PSS / E), IEEE (ISIEA), Малайзия, 2011 г.

6. Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э, Мударисов Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения, Вестник Казанского технологического университета. 2019. Т. 11 №1 (41). С. 28-36.

7. Ван Б., Сун К. Формулировка и характеристика электромеханических колебаний энергосистемы, IEEE Transactions on Power Systems, 2017.

8. Карлссон Б. Сравнение PSSE и PowerFactory», Университет Упсалы, проект по инженерной физике, Швеция, 2013 г.

9. Альзакар А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки устойчивости напряжения электроэнергетических систем в Сирии, Международный технико-экономический журнал. 2020. № 1. С. 87-95.

10. Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., и др. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы, ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, Т. 22, № 2 (2020). С. 51–64.

11. Нисикава Т и А. Моттер, «Сравнительный анализ существующих моделей синхронизации энергосистемы», Новый журнал физики, Институт физики IOP 2015.

12. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии, ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22, № 1. С. 85–92.

13. Х. Сувайдан, «Изучите влияние коротких замыканий на стабильность переходных процессов в сирийской электрической системе с помощью программы PSS / E», Журнал технических наук, Университет Дамаска, 2010.

14. Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э., Мударисов Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 102–112.

15. Альзакар А., Хассан Ф.А, Местников Н.П. Исследование обеспечения устойчивости частоты в электроэнергетических системах на уровне напряжения 400 кВ в Сирийской Арабской Республике. SpringerLink, Advances in Automation II. 2021, С. 891-902.

16. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Ханнанова В.Н. Идентификация Параметров Трехфазного Асинхронного Двигателя При Изменении Начальных Значений Оценок В Широком Диапазоне. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № 12-11. С. 87–96.

17. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Герасимов Д.О. Современные подходы к оценке качества электрической энергии. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ.2017. Т. 19. № 7-8. С. 85–93.
18. Ашик А. и Шахид М. Динамическая эквивалентность большой энергосистемы с использованием симулятора энергосистемы для инженеров (PSS / E), <https://www.researchgate.net>, 2015.
19. Сианипар Ж. и Найборху Дж. Определение критического времени очистки при переходном анализе устойчивости, Международная конференция по электротехнике и информатике (ICEECS), Индонезия, 2018.
20. . Занг Х., Минго О и. Яанмин С. Обзор развития энергосистем Ближнего Востока, <https://www.springer.com/>, 2017.
21. Кастинен П и Вангди В. Исследование времени устранения критических повреждений путем применения различных моделей системы возбуждения, Инновационный конгресс (RI2C), 2019.
22. Зедан Ф. Возможности и препятствия в торговле электроэнергией и газом в арабском мире. Конференция по торговле энергией ПАН-АРАБ, 2019.

### Авторы публикации

**Альзаккар Ахмад** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Местников Николай Петрович** – аспирант Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, ведущий инженер отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН им. В.П. Ларионова.

**Алхадж Хассан Фуад** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Валеев Ильгиз Миргалимович** – д-р технических наук, профессор университета электроэнергетики, Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Stogov AYu., Belyaev AN. Improvement of Transient Stability of Autonomous Power System on Basis of Wide Area Control System. *Journal of Energy Problems*. 2019;21(1-2):56-66.
2. Valeev IM., Ahmad M-N. Alzakkar, Harmonicas and their Influence When Determining the Method of Compensation of Jet Power in Electrical Networks. *Vestnik Kazan State Power Engineering University*. 2020;12(1):(45) 2020:24-39.
3. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Calculation of the Economy of Electric Energy in Industrial Electrical Supply Systems. *Journal of Energy Problems*. 2020;22(2):65-74.
4. S.Tsegaye, A.Fante. Analysis of Synchronous Machine Excitation Systems: Comparative Study. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2016; 10.
5. Mohamad A, Hashim N and N.Hamzah. *Transient Stability Analysis on Sarawak's Grid Using Power System Simulator for Engineering (PSS/E)*. IEEE (ISIEA), Malaysia, 2011.
6. Fedotov AI, Abdullazyanov RE, Mudarisov RM. Synchronous Motors Stability Estimation Methodologies Under Three-Phase Faults in Power Supply Grids. *Vestnik KSPEU*. 2019;11:1 (41):28-36.
7. Wang B.and Sun K. *Formulation and Characterization of Power System Electromechanical Oscillations*. IEEE Transactions on power systems, 2017.
8. Karlsson B. Comparison of PSSE & PowerFactory. *Uppsala University, Project in Engineering Physics*. Sweden, 2013.
9. Alzakkar A, Application of Artificial Neural Networks to Evaluate Stability of Voltage of Electric Power Systems in Syria. *The international technical-economic journal*. 2020;1:87-95.
10. Fishov AG, Murashkina IS, Marchenko AI, et al. The Study of Electronic Generation Effect on Statical Aperiodic Stability of Electrical Power System. *Journal of Energy Problems*. 2020;22(2):51-64.
11. Nishikawa T. and Motter A. Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization. *New Journal of Physics, IOP Institute of Pysics*. 2015.
12. Naumov A.A. The Required Quality of Electrical Energy Provision. *Journal of Energy Problems*. 2020;22(1):85-92.
13. Suwaidan H. Study the impact of short circuits on transient stability in the Syrian electrical system using the program PSS / E. *Engineering Sciences Journal, Damascus university*, 2010.

14. Fedotov AI, Mudarisov RM, Abdullazyanov RE. Assessment Methodologies for Synchronous Motors Stability Under Three-Phase Faults In Power Supply Grids. *Journal of Energy Problems*. 2019; 21(3-4):102–112.

15. Alzakkar A, Hassan F.A, Mestnikov N. Support of Frequency Stability in Electrical Power System at Voltage 400 kV in Syria, *SpringerLink*. Advances in Automation II. 2021. p. 891-902.

16. Afanasyev AYu, Makarov VG. Identification of Parameters of Three-Phase Asynchronous Motor When Changing Initial Values of Estimates in a Wide Range, *Journal of Energy Problems*. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;12-11:87-96.

17. Suslov KV, Solonina NN, Gerasimov DO. Modern Approaches To Estimation Of Power Quality. *Journal of Energy Problems*. 2017;19(7-8):87-96.

18. Ashik A and Shahid M. *Dynamic equivalence of a large power system using power system simulator for engineers (PSS/E)*, <https://www.researchgate.net>, 2015.

19. Sianipar G. and Naiborhu J. *Determination of Critical Clearing Time in Transient Stability Analysis*. International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Indonesia, 2018.

20. X.Zhang ,O.Mingyu and S.Yanmin. *Review of Middle East energy interconnection development*. <https://www.springer.com/>, 2017.

21. Kastinen P. and Wangdee W. *Investigation of Critical Fault Clearing Time by Applying Different Excitation System Models*. Innovation Congress (RI2C), 2019.

22. Zedan F. *Opportunities and obstacles in electricity and gas trade in the arab world*. The PAN-ARAB Energy Trade Conference, 2019.

#### **Authors of the publication**

**Ahmad Alzakkar** – Institute of Electric Power Engineering of Kazan State Power Engineering University.

**Nikolai P. Mestnikov** – Northeast Federal University named after M.K. Ammosov, engineer of the electric power department of IFTPN SB RAS named after V.P. Larionov.

**Hassan Fouad Alhajj** – Electric Power Engineering of Kazan State Power Engineering University.

**Ilgiz M. Valeev** – Kazan State Power Engineering University.

**Получено**

**25 июля 2021г.**

**Отредактировано**

**10 августа 2021г.**

**Принято**

**24 августа 2021г.**