

УДК 621.31

**Пакирдинов Рустам Рахматуллаевич**, к.т.н., доцент,  
**Пакирдинов Рустам Рахматуллаевич**, т.и.к., доцент,  
**Pakirdinov Rustam Rakhmatullaevich**  
candidate of technical sciences, dossent

**Жунусалиев Акылбек Сайдазович**, магистр  
**Жунусалиев Акылбек Сайдазович**, магистр

**Zhunusaliev Akylbek Saidazovich**, magistr

**Осоров Ильяз Аманович**, магистр  
**Осоров Ильяз Аманович**, магистр

**Osorov Ilyaz Amanovich**, magistr

**Абсамат кызы Гулиза**, магистр  
**Абсамат кызы Гулиза**, магистр

**Absamat kyzy Guliza**, magistr

*Ош Технологиялык Университети*  
*Ошский Технологический Университет*  
*Osh Technological University*

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ ОШ ТЭЦ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ НА ОЖИДАЕМУЮ МОЩНОСТЬ 100 МВт)**

**Аннотация:** В работе выполнены практические расчеты и разработки математической модели электромеханического переходного процесса на примере расчета коротких замыканий при модернизации Ош ТЭЦ, также она содержит достаточно сложные расчеты. Но эти расчеты в то же время дают основные понятия проектирования расчетов тока к замыканию и сети точных напряжений: для выбора аппаратов и проводников настройки релейной защиты и автоматики, выявления высоковольтных линий электропередач на линии связи и сигнализации, выбора числа заземления нейтрале в системе и для ряда других переходных процессов. Такие проектирования как расчеты трехфазных токов короткого замыкания I к.з., несимметричных КЗ.

**Ключевые слова:** базисная мощность, базисный ток, переходный процесс, ток короткого замыкания

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫК ӨТМӨ ПРОЦЕССТЕРДЕ ЭСЕПТӨӨЛӨРДҮ АТКАРУУ  
ҮЧҮН МАТЕМАТИКАЛЫК МОДЕЛИ  
(100 МВТ КҮТҮЛГӨН КУБАТТУУЛУККА ЧЕЙИН МОДЕРНИЗАЦИЯЛОО  
МЕЗГИЛИНДЕГИ ОШ ЖЭБИНИН МИСАЛЫНЫН НЕГИЗИНДЕ)**

**Аннотация:** Иште практикалык эсептөөлөр жүргүзүлүп, Ош Жылуулук Электр Борборун модернизациялоодо кыска туташууларды эсептөө мисалында электромеханикалык өтмө процесстин математикалык модели иштелип чыккан, анда өтө татаал эсептөөлөр да камтылган. Бирок бул эсептөөлөр ошол эле учурда так чыңалуулардын түйүндөрүнө жана тармактарына токтун эсептөөлөрүн долбоорлоонун негизги түшүнүктөрүн берет: релелик коргоону жана автоматиканы орнотуу үчүн түзүлүштөрдү жана өткөргүчтөрдү тандоо, байланыш жана сигнал берүү линияларында жогорку вольттогу электр линияларын аныктоо, системасында нейтралдуу негизделүүчү санын тандоо жана башка бир катар убактылуу процесстер үчүн. Мындай эсептөөлөр уч фазалуу кыска туташуу, бир фазалуу кыска туташуу жана асимметриялуу кыска туташуу үчүн зарыл.

**Негизги сөздөр:** базалык кубаттуулук, базалык ток, өтмө процесс, кыска туташуу тогу

**MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATIONS OF ELECTROMECHANICAL  
TRANSIENT PROCESSES (BASED ON THE EXAMPLE OF OSH CHPP DURING  
MODERNIZATION TO AN EXPECTED CAPACITY OF 100 MWT)**

**Abstract.** The work carried out practical calculations and developed a mathematical model of the electromechanical transient process using the example of calculating short circuits during the modernization of the Osh Thermal Power Plant; it also contains quite complex calculations. But these calculations at the same time provide the basic concepts of designing calculations of current to the closure and networks of precise voltages: for selecting devices and conductors for setting up relay protection and automation, identifying high-voltage power lines on communication and signaling lines, choosing the number of neutral grounding in the system and for a number of other transient processes. Such designs as calculations of three-phase short circuit currents I short circuit, asymmetrical short circuit.

**Key words:** base power, base current, transient process, short circuit current

**Выведение**

В настоящее время все проекты осуществляются с учетом показателей надежности отдельных элементов и показателей ряд расчетов электромагнитных и механических переходных процессов, которое представляет собой сложный процесс выработки и принятия решений по схемам электрических соединений, составу электрооборудования и его размещению. В системе следует уделять особое внимание расчетам переходных процессов и ее элементов. Это может приводить к значительным авариям, и следует с достаточной степенью точности оценивать вероятность аварий и возникающий в связи с этим ущербом.

Целью настоящей работы является определение тока короткого замыкания для наиболее тяжелого режима работы сети. Также определение наибольшего и наименьшего величины тока и напряжения, сдвиги между ними и т.д. В расчетах сначала приводятся расчетные формулы, и затем в них подставляют числовые значения каждый

выполненный пункт, и заканчивается выводами и соответствующими рекомендациями по существу полученных результатов. Также составление технически возможных вариантов структурной схемы и обоснованный выбор наилучшего подходящего с учётом надёжности; оценка новых структурных схем ТЭЦ с помощью расчёта и сопоставления по технико-экономическим показателям. при трехфазном коротком замыкании в заданной точке определить аналитическим путем первоначального значения сверхпереходного тока в местах короткого замыкания, ударный ток и его действующее значение.

Расчет токов короткого замыкания проведен для пяти точек (см. рис. 1), выбранной ранее структурной схемы. Данные элементов схемы взяты из [1,5] в соответствии с типом оборудования.

Нагрузки учитываются только при расчете ЭДС по коэффициенту предварительной загрузки генератора К1 – для выбора электрического оборудования в РУ – 110 кВ;

К2 – для выбора электрического оборудования в ГРУ – 10 кВ;

К3 – при КЗ на ТСН;

К4, К5 – при КЗ на шин для выбора кабельных линий.

Расчет произведен в относительных единицах с приближенным учетом коэффициентов трансформации, для упрощения расчета токов коротких замыканий [1].

Базисная мощность –  $S_6 = 63 \text{ МВА}$

За базисные напряжения приняты [2.3]. :

$$U_{61} = 115 \text{ кВ}; U_{611} = 10,5 \text{ кВ}; U_{6111} = 6,3 \text{ кВ}$$

Базисный ток первой ступени:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,316 \text{ кА}$$

Базисный ток второй ступени:

$$I_{611} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{611}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 3,46 \text{ кА}$$

Базисный ток третьей ступени:

$$I_{6111} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6111}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 5,77 \text{ кА}$$

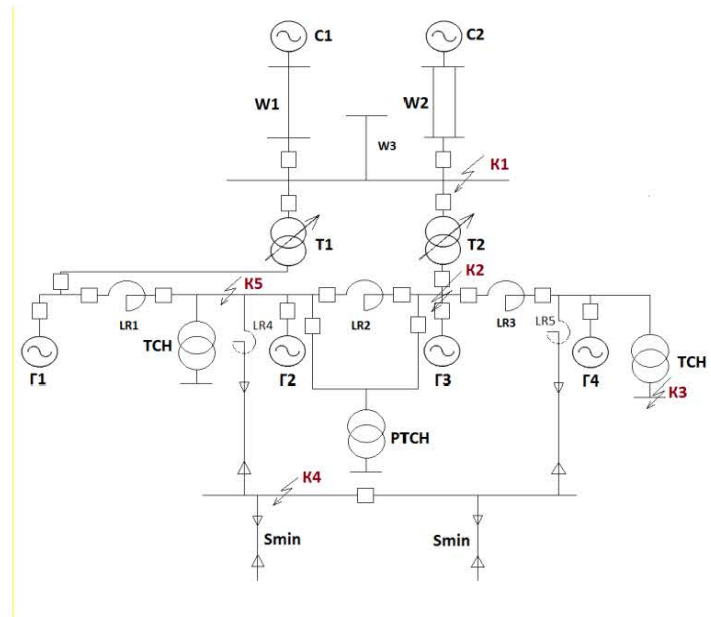


Рис. 1. Расчетная схема токов КЗ

Определяем начальные значения периодической составляющей тока короткого замыкания. Для расчета начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания составлена эквивалентная схема замещения, в которой все реальные элементы замещаются индуктивными сопротивлениями, а генераторы и система – индуктивными сопротивлениями и ЭДС. При вычислении постоянной времени затухания токов короткого замыкания и ударного коэффициента при расчете суммарного индуктивного сопротивления в схеме замещения генераторы учитываются индуктивным сопротивлением обратной последовательности, а при расчете суммарного активного сопротивления в элементы замещаются соответствующими активными сопротивлениями [1,2].

Эквивалентная схема замещения для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени  $I_{п0}$  представлена на рис. 2.

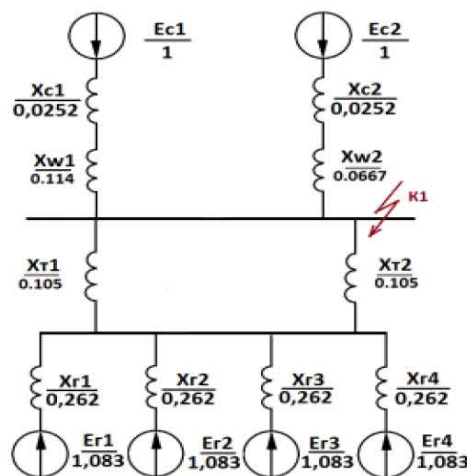


Рис. 2. Расчетная схема токов короткого замыкания

Параметры систем С1 и С2:

$$E_{*C1(\delta)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{U_{\delta 1}} = \frac{115}{115} = 1;$$

$$E_{*C2(\delta)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{U_{\delta 1}} = \frac{115}{115} = 1;$$

$$X_{*C1(\delta)} = X_{C1} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma 1 \text{ ном}}} = 1,2 \cdot \frac{63}{3000} = 0,0252;$$

$$X_{*C2(\delta)} = X_{C2} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma 2 \text{ ном}}} = 1,0 \cdot \frac{63}{2500} = 0,0252$$

Параметры линий КЛ1:

$$X_{*w1(\delta)} = X_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{63}{115^2} = 0,114$$

Параметры линий КЛ2:

$$X_{*w2(\delta)} = \frac{1}{n_{\text{ц}}} \cdot X_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{63}{115^2} = 0,0667$$

Параметры трансформаторов Т1 и Т2:

$$X_{*T1(\delta)} = X_{*T2(\delta)} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{63}{63} = 0,105$$

Параметры генераторов Г1, Г2, Г3, Г4:

$$E_{*\Gamma 1(\delta)} = E_{*\Gamma 2(\delta)} = E_{*\Gamma 3(\delta)} = E_{*\Gamma 4(\delta)} = \sqrt{(U_{*(0)} + I_{*(0)} \cdot X_{*d(\text{ном})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{ном}})^2 + (I_{*(0)} \cdot X_{*d(\text{ном})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{ном}})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 + 1 \cdot 0,13 \cdot 0,6)^2 + (1 \cdot 0,13 \cdot 0,8)^2} = 1,083;$$

$$X_{\Gamma 1} = X_{\Gamma 2} = X_{\Gamma 3} = X_{\Gamma 4} = X_{*d}'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} = 0,13 \cdot \frac{63}{31,25} = 0,262$$

В дальнейших расчетах для упрощения обозначение «\*» и «(δ)» будет опущено.

За расчетную точку приняли точку К1.

$$X_{\text{эке}} = \frac{X_{\Gamma 1}}{4} = \frac{0,262}{4} = 0,0655;$$

$$E_{\Gamma \text{эке}} = E_{\Gamma 1} = 1,083; \quad E_{C \text{эке}} = E_{C1} = 1$$

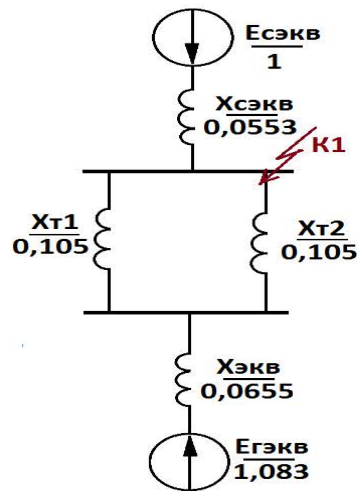


Рис. 3. Эквивалентная схема 1

$$X_{C_{эkv}} = \frac{(X_{C1} + X_{W1}) \cdot (X_{C2} + X_{W2})}{X_{C1} + X_{W1} + X_{C2} + X_{W2}} = \frac{(0,0252 + 0,114) \cdot (0,0252 + 0,0667)}{0,0252 + 0,114 + 0,0252 + 0,0667} = 0,0553;$$

$$X_{Г_{эkv}} = \frac{X_{T1}}{2} + X_{эkv} = \frac{0,105}{2} + 0,0655 = 0,118$$



Рис. 4. Эквивалентная схема 2

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ. Ток со стороны системы:

$$I_{п0с} = \frac{E_{C_{эkv}}}{X_{C_{эkv}}} = \frac{1}{0,0553} = 18,08$$

В именованных единицах:

$$I_{п0с} = I_{п0с(б)} \cdot I_{б1} = 18,08 \cdot 0,316 = 5,71 \text{ кА}$$

Ток со стороны генератора:

$$I_{п0г} = \frac{E_{Г_{эkv}}}{X_{Г_{эkv}}} = \frac{1,083}{0,118} = 9,178$$

В именованных единицах:

$$I_{п0г} = I_{п0г(б)} \cdot I_{от} = 9,178 \cdot 0,316 = 2,9 \text{ кА}$$

Суммарный ток КЗ:

$$I_{п0} = I_{п0с} + I_{п0г} = 5,71 + 2,9 = 8,61 \text{ кА}$$

Определяем ударный ток короткого замыкания. Эквивалентная схема замещения для расчета ударного тока КЗ  $i_{уд}$  представленная на рис. 5 представляет собой схему замещения обратной последовательности, на которой все элементы расчетной схемы представлены соответствующими сопротивлениями постоянному току (индуктивные сопротивления не показаны) [1,2].

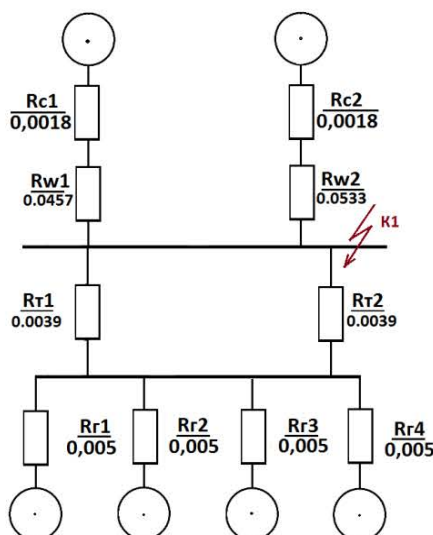


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения для расчета ударного тока КЗ.

Активное сопротивление систем С1:

$$T_a = \frac{-0,01}{\ln(K_{уд} - 1)} = \frac{-0,01}{\ln(1,8 - 1)} = 0,045 \text{ с};$$

$$R_{C1} = \frac{X_{C1}}{\omega_{снх} \cdot T_a} = \frac{0,0252}{314 \cdot 0,045} = 0,0018$$

Активное сопротивление систем С2:

$$R_{C2} = \frac{X_{C2}}{\omega_{снх} \cdot T_a} = \frac{0,0252}{314 \cdot 0,045} = 0,0018$$

Активное сопротивление линий КЛ1:

$$R_{w1} = R_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = 0,16 \cdot 60 \cdot \frac{63}{115^2} = 0,0457$$

Активное сопротивление линий КЛ2:

$$R_{w2} = \frac{1}{n_{ц}} \cdot R_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,16 \cdot 70 \cdot \frac{63}{115^2} = 0,0533$$

Активное сопротивление трансформаторов Т1 и Т2:

$$R_{T1} = R_{T2} = \frac{\Delta P_k \cdot 10^{-3}}{S_{ном}} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} = \frac{245 \cdot 10^{-3}}{63} \cdot \frac{63}{63} = 0,0039$$

Генераторы вводим в схему замещения сопротивлением обратной последовательностью.

$$X'_{Г1} = X'_{Г2} = X'_{Г3} = X'_{Г4} = X_{2(ном)} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} = 0,16 \cdot \frac{63}{31,25} = 0,322$$

Активное сопротивление генераторов Г1, Г2, Г3, Г4 [1]:

$$R_{Г1} = R_{Г2} = R_{Г3} = R_{Г4} = \frac{X'_{Г1}}{\omega_{снх} \cdot T_a} = \frac{0,322}{314 \cdot 0,2} = 0,005;$$

$$R_{экв} = \frac{R_{Г1}}{4} = \frac{0,005}{4} = 0,0013$$

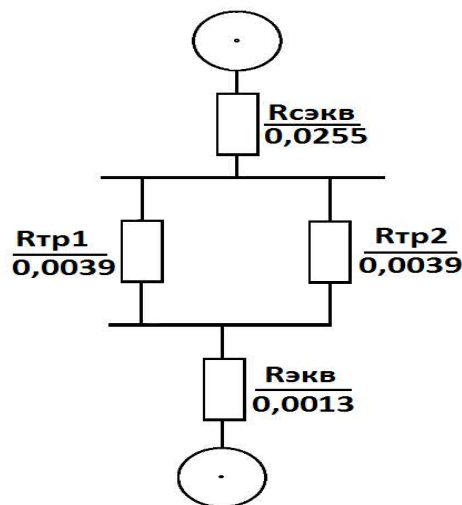


Рис. 6. Эквивалентная схема 1



$$R_{C_{\text{экв}}} = \frac{(R_{C1} + R_{W1}) \cdot (R_{C2} + R_{W2})}{R_{C1} + R_{W1} + R_{C2} + R_{W2}} = \frac{(0,0018 + 0,0457) \cdot (0,0018 + 0,0533)}{0,0018 + 0,0457 + 0,0018 + 0,0533} = 0,0255;$$

$$R_{Г_{\text{экв}}} = \frac{R_{Г1}}{2} + R_{\text{экв}} = \frac{0,0039}{2} + 0,0013 = 0,0033$$

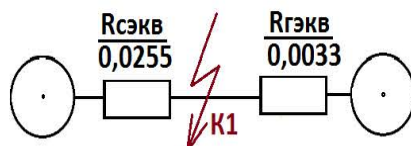


Рис. 7. Эквивалентная схема 2

Ударный ток определен по формуле, кА:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot K_{\text{уд}},$$

где  $I_{\text{п0}}$  – начальное значение периодической составляющей тока КЗ, кА;  $K_{\text{уд}}$  – ударный коэффициент.

Ударный ток со стороны системы [3,4].

$$T_{ac} = \frac{X_{C_{\text{экв}}}}{\omega_{\text{синх}} \cdot R_{C_{\text{экв}}}} = \frac{0,0553}{314 \cdot 0,0255} = 0,007 \text{ с};$$

$$K_{\text{удс}} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_{ac}}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,007}} = 1,24;$$

$$i_{\text{удс}} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{удс}} \cdot I_{\text{п0с}} = \sqrt{2} \cdot 1,24 \cdot 5,71 = 10,01 \text{ кА.}$$

Ударный ток со стороны генератора:

$$T_{ar} = \frac{\frac{X'_{Г1}}{4} + \frac{X_{TP}}{2}}{\omega_{\text{синх}} \cdot R_{Г_{\text{экв}}}} = \frac{\frac{0,322}{4} + \frac{0,0039}{2}}{314 \cdot 0,0033} = 0,08 \text{ с};$$

$$K_{\text{удг}} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_{ar}}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,08}} = 1,9;$$

$$i_{\text{удг}} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{удг}} \cdot I_{\text{п0г}} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 2,9 = 7,8 \text{ кА.}$$

Суммарный ударный ток:

$$i_{уд} = i_{удс} + i_{удг} = 10,01 + 7,8 = 17,81 \text{ кА.}$$

Результаты расчета приведены в табл. 1.

**Таблица .1- Результаты расчета токов КЗ**

Точка КЗ	Источник тока	$I_{по}, \text{кА}$	$i_{уд}, \text{кА}$
К1	С	5.71	10.01
	Г	2.9	7.8
	С+Г	8.61	17.81

В заключении следует отметить, что в данной работе проанализированы оптимальные варианты и сопоставлены технические параметры схем распределительных устройств станции, выполнен расчет токов короткого замыкания и выбор электрооборудования. В результате расчета и сравнения приемлемых вариантов был предпочтен схема с поперечной связью блоков на генераторном напряжении. Предполагается использование блоков с генераторными выключателями. Блок включает в себя турбогенератор ТВС-25-2У3 и трансформатор связи ТДЦН-63000/110. Распределительное устройство 110 кВ планируется выполнить по схеме пятиугольник. В РУ ВН предполагается применить вакуумные выключатели.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке методики проектирования, при построении математической модели и разработке программу для выполнения расчетов электромеханических и электромагнитных переходных процессов или же в модернизации теплоэлектроцентрали Ош.

### Литература

1. Амиров Н.А. Построение математической модели и разработка программу для выполнения расчетов электромеханических переходных процессов (на примере Ош ТЭЦ при модернизации на ожидаемую мощность 100 МВт). Магистерская диссертация-Ош,2019.-69 стр.
2. Ульянов С. А. "Электромагнитные переходные процессы в электрических системах".- М. Энергия, 1970 г.
3. Пакирдинов Р.Р.,Осмонбеков Р.Т. Методические указания к выполнению курсовых работ по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов электроэнергетических специальностей высших учебных заведений. -Ош: ОшТУ, 2012. -43 стр.

4. Пакирдинов Р.Р., Осмонбеков Р.Т. Методические указания к выполнению практич. работ по дисц. «Электромагнитные переходные процессы» для студентов электроэнергетических специальностей высших учебных заведений. -Ош: ОшТУ, 2009. -34 стр.
5. **PROCEEDINGS. OF THE IV-INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED INNOVATIVE DEVELOPMENT OF ZARAFSHAN REGION: ACHIEVEMENTS, CHALLENGES AND PROSPECTS** dedicated to the 65th Anniversary of Navoi Mining and Metallurgical Company 16-17 November, 2023. Navoi, Uzbekistan, -212p.