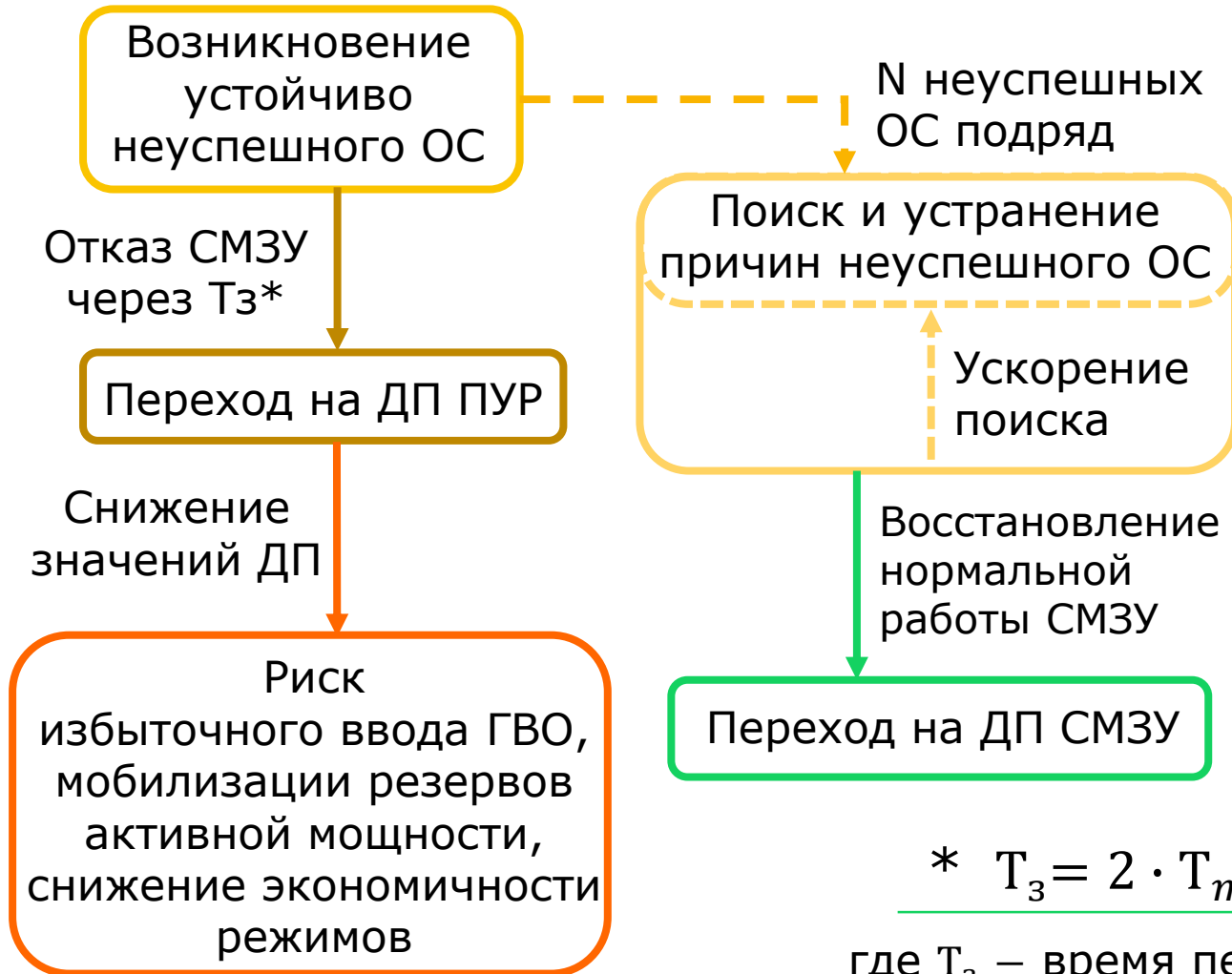


МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН НЕУСПЕШНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Авторы:

Тайдонова Анастасия Михайловна – студентка ИШЭ ТПУ
Васильев Алексей Сергеевич – к.т.н, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ
Вагапов Никита Ринатович - заместитель начальника СЭР,
АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири

ПРОБЛЕМА



Причины, которые могут привести к устойчиво неуспешному оцениванию состояния (ОС):

- критическая недоверность ТМ;
- недостаточная наблюдаемость ТМ;
- существование ошибок в модели;
- некорректный дорасчет.

$$* T_3 = 2 \cdot T_{max} + 5 + T_{уц} ,$$

где T_3 – время перехода с ДП СМЗУ на ДП ПУР

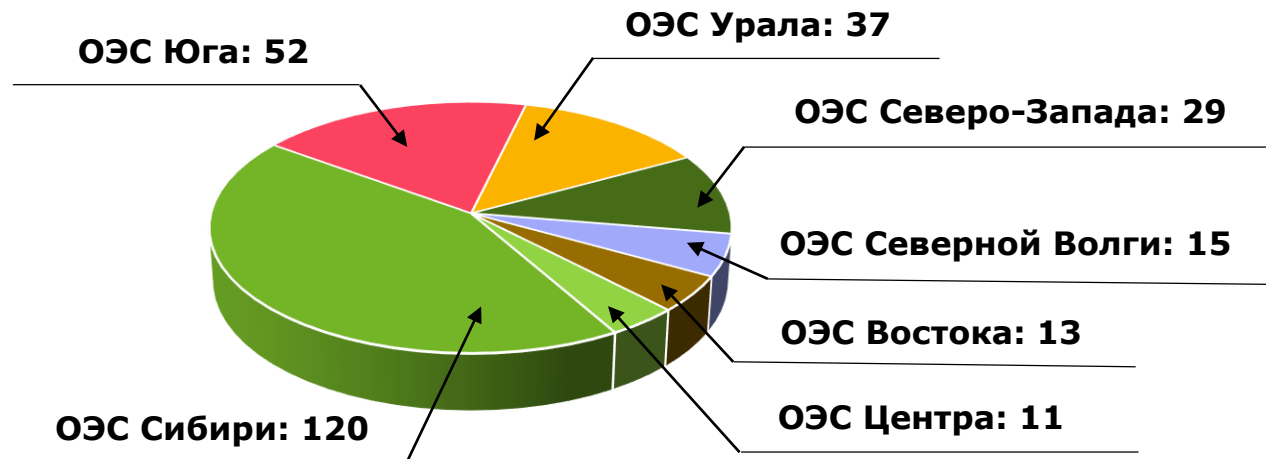
T_{max} – максимальная длительность цикла расчета ДП СМЗУ

$T_{уц}$ – время ускоренного цикла (принимается 60 с)

ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ

Цель

Разработать и обосновать алгоритмы быстрого поиска причин неуспешного ОС СМЗУ для снижения числа отказов СМЗУ или минимизации времени восстановления её работы.



Актуальность

На сегодняшний день цифровая система мониторинга запасов устойчивости используется для 281 сечения ЕЭС России – это около 18% от их общего числа.

Рисунок 1 – Распределение сечений с СМЗУ по ЕЭС России



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1) **Сбор и подготовка исходных данных** на основе файлов трассировки `roc_debug_before_OS`, автоматизация формирования тестовых наборов файлов трассировки

2) Разработка и автоматизация отдельных этапов работы алгоритмов поиска причин неуспешного оценивания состояния:

2.1) путём поочередного исключения части объектов схемы из модели

2.2) на основе анализа изменения множителя Лагранжа

3) Промежуточное тестирование и анализ результатов

4) Корректировка алгоритмов по полученным результатам

5) Апробация алгоритмов на тестовых наборах файлов трассировки

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

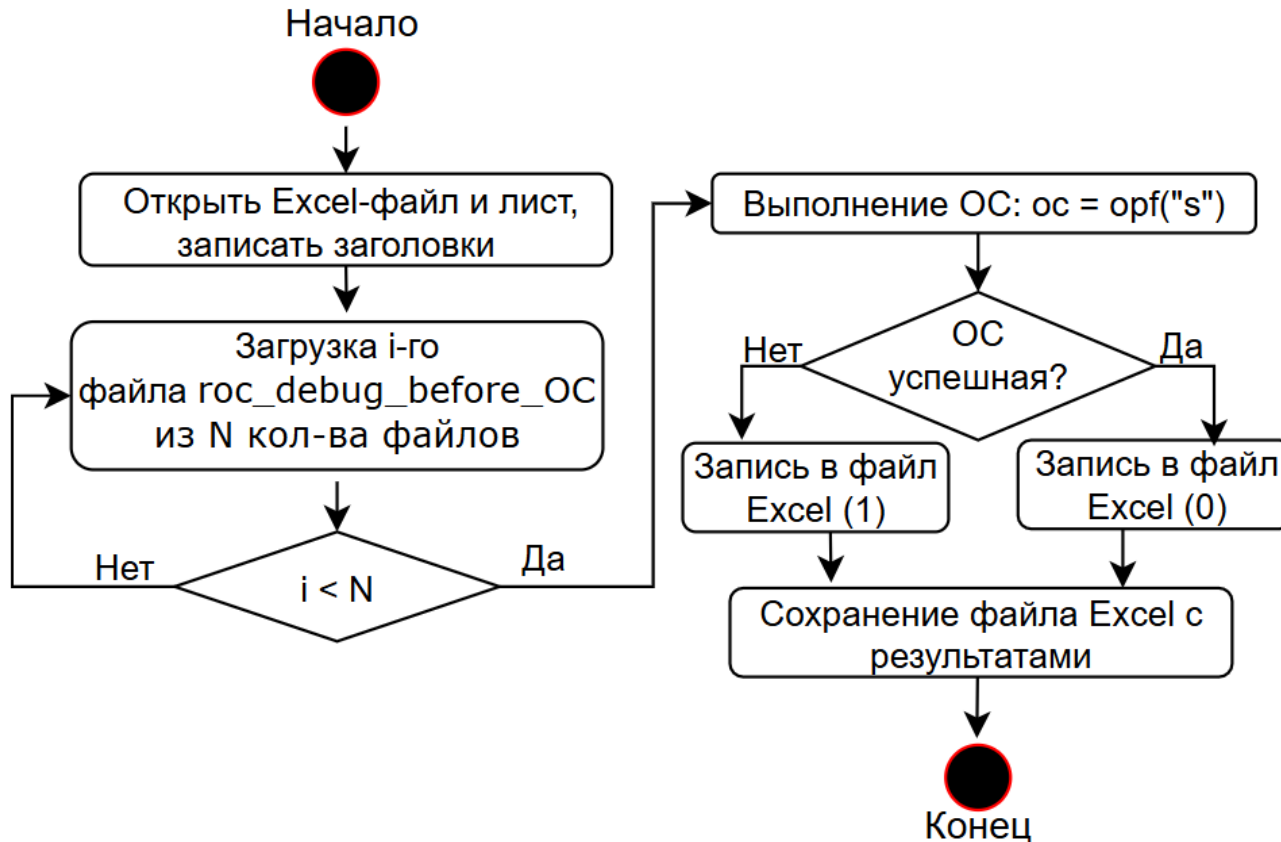


Рисунок 2 – Блок схема скрипта для выполнения ОС в исходном режиме для N количества срезов

Набор 1. Сформирован список файлов, где ОС было неуспешным (166 шт.), на всем наборе срезов ТМ за сутки 11.01.2023 (1080 шт.).

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Набор 2. Выделены файлы, в которых приход некорректного ТС «Отключено» от генераторов мощностью ≥ 10 МВт стал причиной неуспешного ОС.

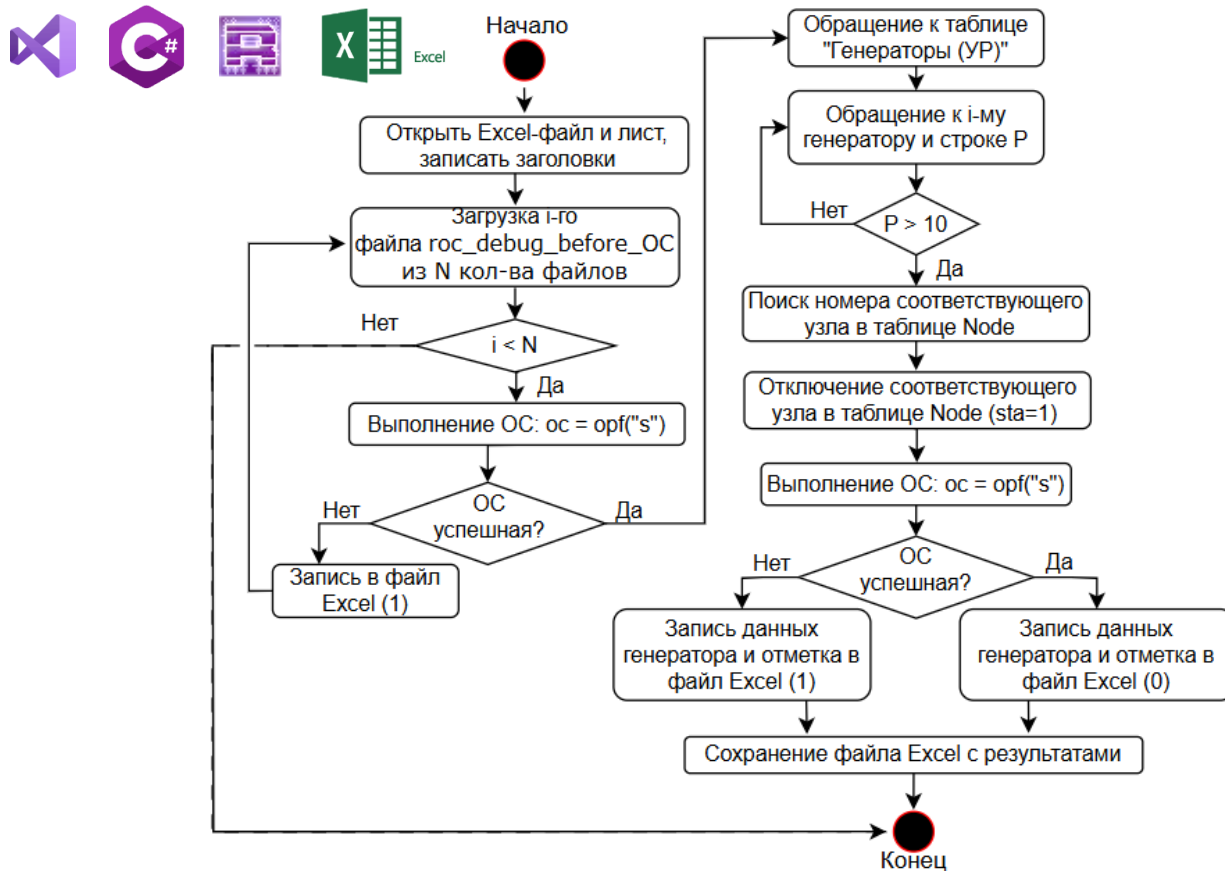


Рисунок 3 – Блок схема скрипта для моделирования прихода некорректного ТС «Отключено» поочередно с каждого генератора в сети

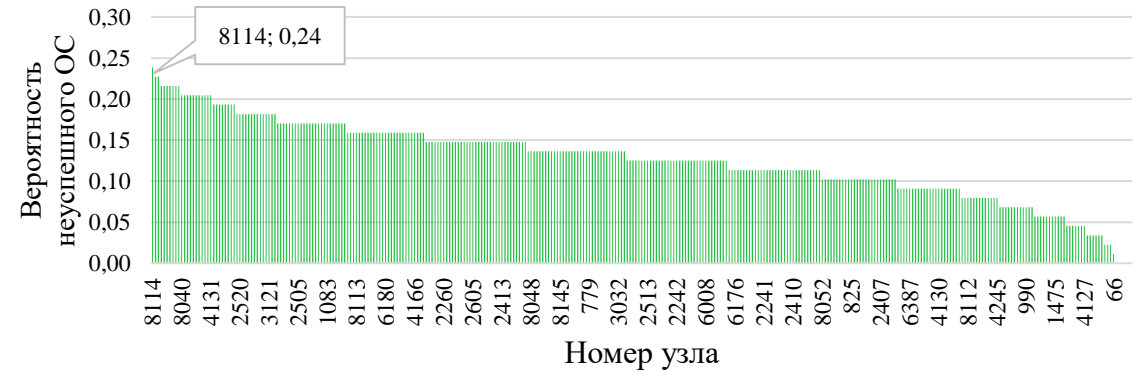


Рисунок 4 – Гистограмма вероятности неуспешного ОС после потери ТС генератора



Рисунок 5 – Распределение вероятности неуспешного ОС после потери ТС

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

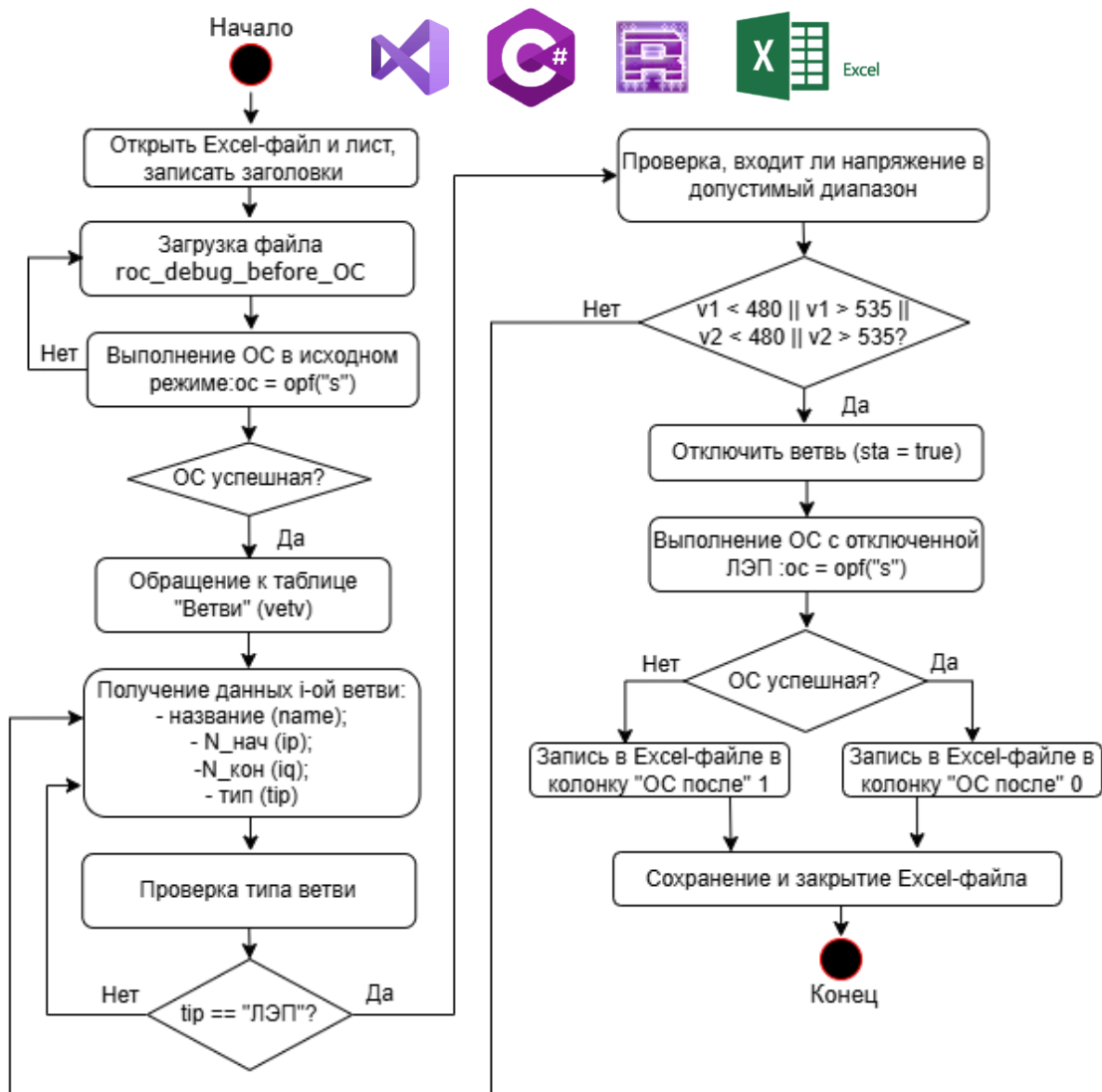


Рисунок 6 – Блок схема скрипта для моделирования потери ТИ поочередно с каждой ЛЭП класса напряжения 500 кВ в сети

Набор 3. Сформирован перечень файлов, в которых некорректный ТС «Отключено» от ЛЭП класса напряжения 500 кВ привёл к неуспешному ОС.

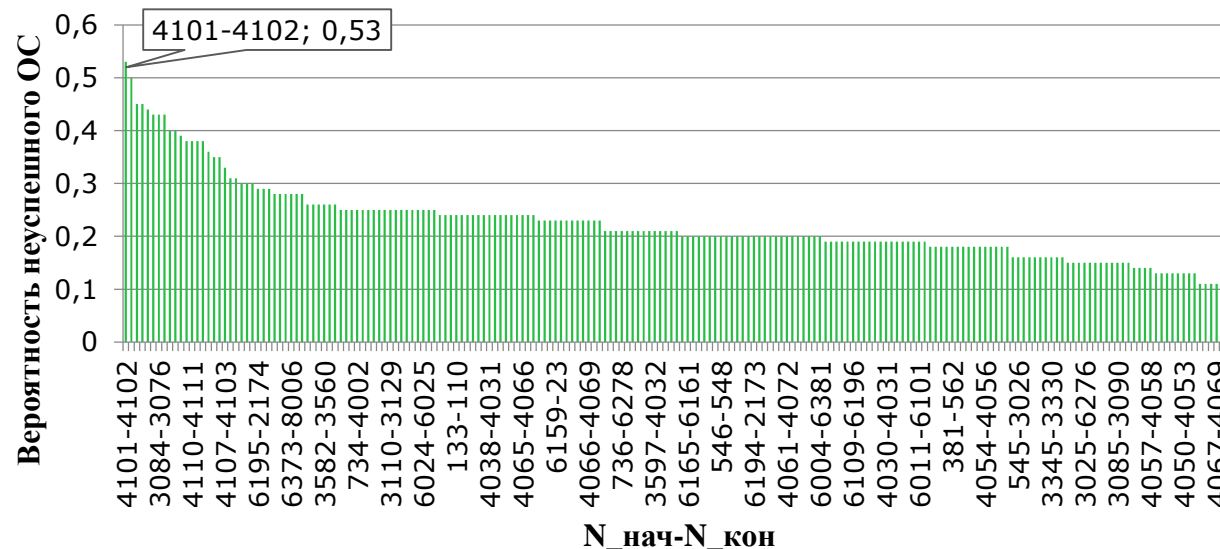


Рисунок 7 – Гистограмма вероятности неуспешного ОС после прихода некорректного значения ТС

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПРИЧИН НЕУСПЕШНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ПООЧЕРЕДНОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТИ ОБЪЕКТОВ

ОБОБЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА №1

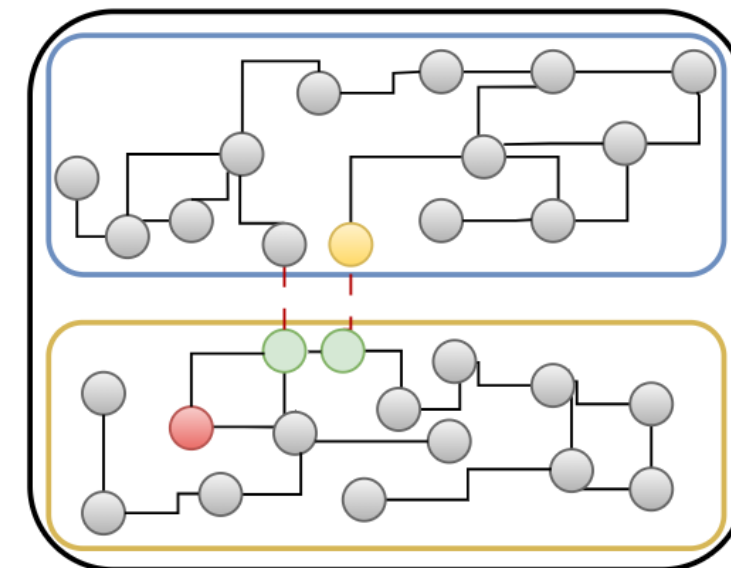
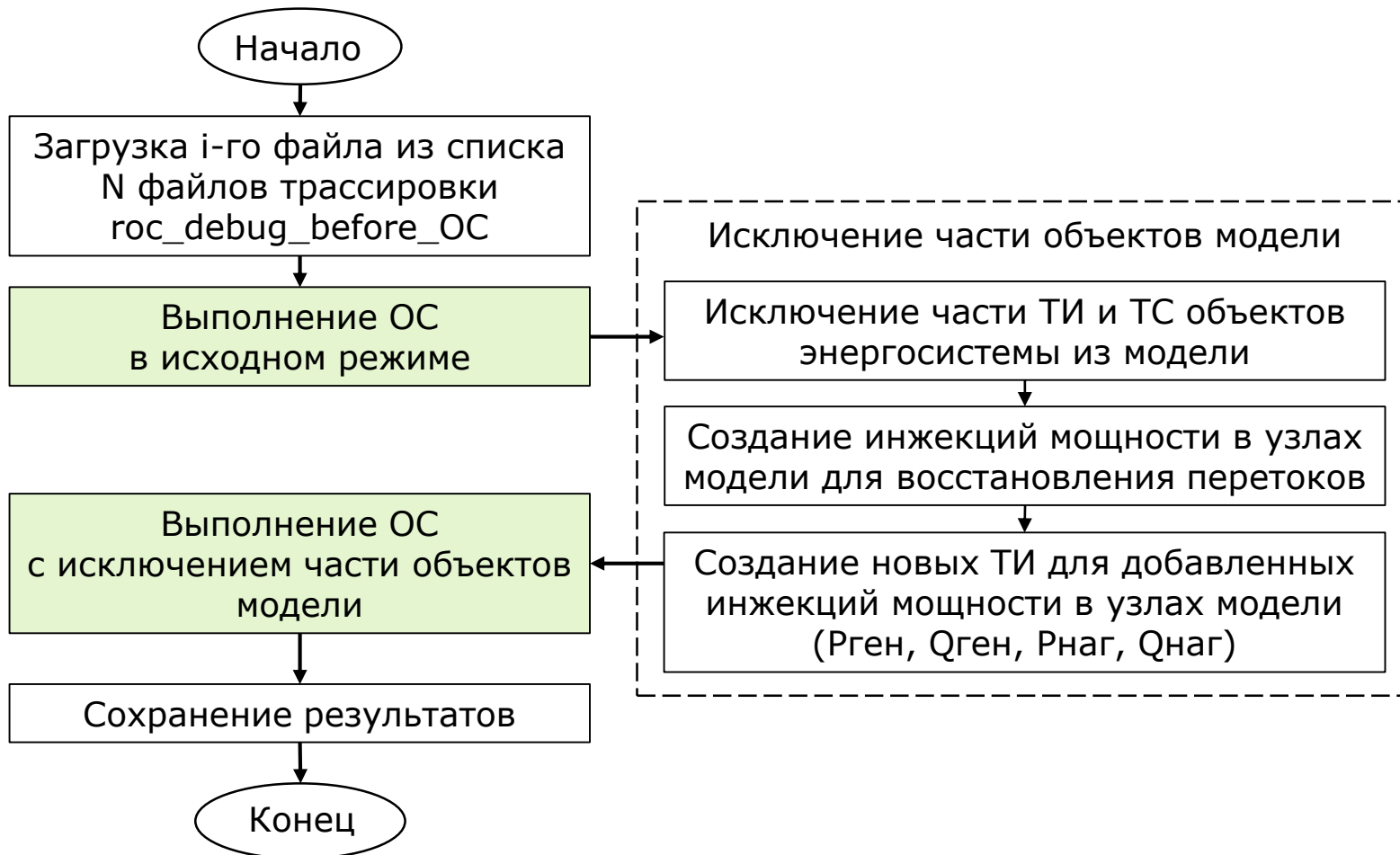


Рисунок 9 – Графическое представление алгоритма

Рисунок 8 – Этапы работы алгоритма поиска причин неуспешного ОС методом поочередного исключения части объектов из модели

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ РЕЖИМНОЙ СИТУАЦИИ ИСХОДНОМУ РЕЖИМУ НА ОСНОВЕ ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОВЕРКЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СМЗУ

Таблица 1 – Допустимые отклонения параметров электроэнергетического режима при проверке функционирования СМЗУ в части корректности выполнения оценивания состояния

Параметр	Допустимые отклонения при номинальном напряжении, не более**		
	220 кВ и ниже	330–500 кВ	750 кВ
Генерация активной мощности	2 % или 10 МВт		
Генерация реактивной мощности	5 % или 25 Мвар		
Потребление и сальдо активной (реактивной) мощности	5 % или 15 МВт (15 Мвар)	5 % или 25 МВт (25 Мвар)	5 % или 30 МВт (30 Мвар)
Перетоки активной (реактивной) мощности по сетевым элементам*			
Уровни напряжения в узлах*	2 кВ	3 кВ	4 кВ

* - При выявлении в отдельных узлах систематических несоответствий параметров электроэнергетического режима в расчетной модели СМЗУ и в ОИК необходимо провести анализ корректности параметров электроэнергетического режима в ОИК. При выявлении в ОИК отдельных параметров электроэнергетического режима, систематически не соответствующих фактическому режиму, их учет при оценке выполнения оценивания состояния не выполняется.

** - Принимается большая величина

Эксперимент по исключению ТМ из ОС

Таблица 2 – Результаты эксперимента

Наименование	№ узла или N_нач/ N_кон ветви	№ ТМ	Привязка «ТИ:Каналы»	Опыт №1		Опыт №2		Опыт №3	
				Исходный режим		Реализация поступления некорректного ТС «Отключено» путем отключение элемента из таблицы «Узлы»		Реализация поступления некорректного ТС «Отключено» путем отключение элемента из таблицы «Узлы» и «ТИ:Каналы»	
				Значение	Оцен	Значение	Оцен	Значение	Оцен
Генератор	4098	442019	Сост.ген.	1	-	1	-	1	-
		33158	Рг	843,01	840,48	844,05	-	844,05	-
		33161	Qг	211,98	217,99	212,42	-	212,42	-
Трансформатор	4097/4098	30702	Сост.ветви	1	-	1	-	1	-
		33157	Рнач	787,57	788,09	787,29	-	787,29	-
		33160	Qнач	76,17	85,07	73,76	-	73,76	-
Смежная линия	4097/4031	18119	Сост.ветви	1	-	1	-	1	-
		14986	Рнач	-752,05	-735,90	-740,21	-581,20	-740,21	-581,20
		14985	Qнач	32,60	25,81	38,09	68,87	38,09	68,87
		21061	Ркон	741,40	725,35	721,02	574,17	721,02	574,17
		21062	Qкон	45,10	45,10	54,93	55,23	54,93	55,23

Полное соответствие

Выводы по эксперименту:

1) При отключении элемента (ТГ-7) через таблицу «Узлы» связанные с ним каналы ТИ/ТС автоматически исключаются из ОС.

2) Работа напрямую с таблицей «ТИ:Каналы» требует дополнительно идентификации по столбцам «ид1», «ид2», «ид3» и «Привязка».

Использование таблицы «Узлы» для отключения элементов схемы признано достаточным для исключения из ОС ТИ и ТС на целевую функцию и принято в качестве основного подхода при дальнейшей реализации алгоритмов.

Применимость замещения части модели и ТИ эквивалентами для локализации местоположения причины неуспешного ОС

Таблица 3 – Результаты эксперимента

№ Узла	Наименование	№ТИ/ПТИ	Привязка	Значение	Оцен.
Выполнение ОС в части сети: Сургутская ГРЭС-2, ПС 500кВ Сомкинская, Нижневартовская ГРЭС, ПС 500 кВ белозерская, ПС 500 кВ Сибирская					
4010	\sum Отключения P	-	\sum^P	-124,20	-137,18
	Эквивалентная ТИ	10000008	\sum^P	-124,20	-140,56
	\sum Отключения Q	-	\sum^Q	80,69	97,54
	Эквивалентная ТИ	10000009	\sum^Q	80,69	95,52
4011	\sum Отключения P	-	\sum^P	-234,00	-233,86
	Эквивалентная ТИ	10000010	\sum^P	-234,00	-227,29
	\sum Отключения Q	-	\sum^Q	319,75	307,73
	Эквивалентная ТИ	10000011	\sum^Q	319,75	301,11

Выводы по эксперименту:

1) Устойчивость ОС сохраняется только в северной части сети (Север Урала и Томская область): причина неуспешной ОС — в остальной части энергосистемы.

2) Для корректного эквивалентирования необходимо учитывать реакторы из таблицы «Реакторы» — они напрямую переносятся в таблицу «Узлы».

Применимость замещения части модели и ТИ эквивалентами для локализации местоположения причины неуспешного ОС

Продолжение таблицы 3

№Узла	Наименование	№ТИ/ПТИ	Привязка	Значение	Оцен
Выполнение ОС в остальной части сети					
4010	\sum Отключения P	-	$\sum P$	133,69	137,18
	Эквивалентная ТИ	10000003	$\sum P$	133,69	142,08
	\sum Отключения Q	-	$\sum Q$	87,52	77,34
	Эквивалентная ТИ	10000002	$\sum Q$	87,52	99,82
4011	\sum Отключения P	-	$\sum P$	309,00	312,89
	Эквивалентная ТИ	10000000	$\sum P$	309,00	312,79
	\sum Отключения Q	-	$\sum Q$	200,73	199,27
	Эквивалентная ТИ	10000001	$\sum Q$	20,73	195,32

Деление схемы на крупные фрагменты требует ввода балансирующих узлов, и формирования списка сечений, что усложняет модель и увеличивает трудоёмкость расчётов.

КОРРЕКТИРОВКА АЛГОРИТМА №1

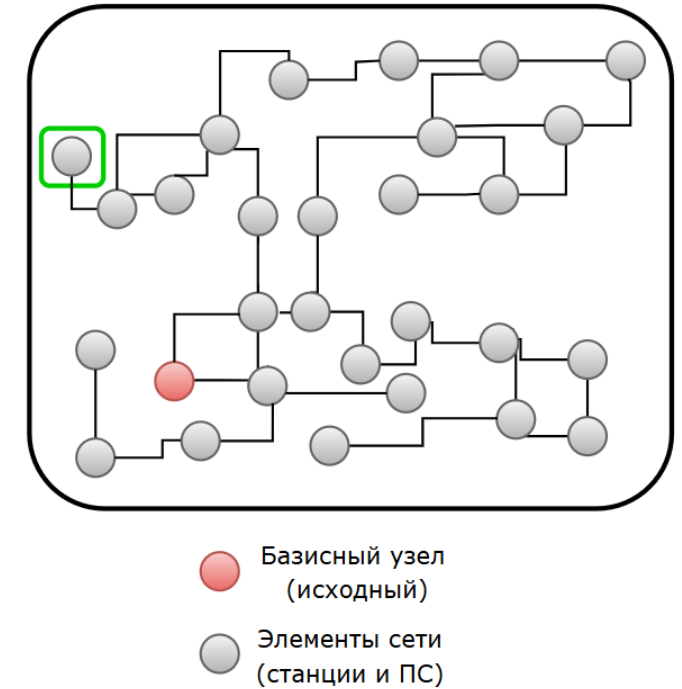
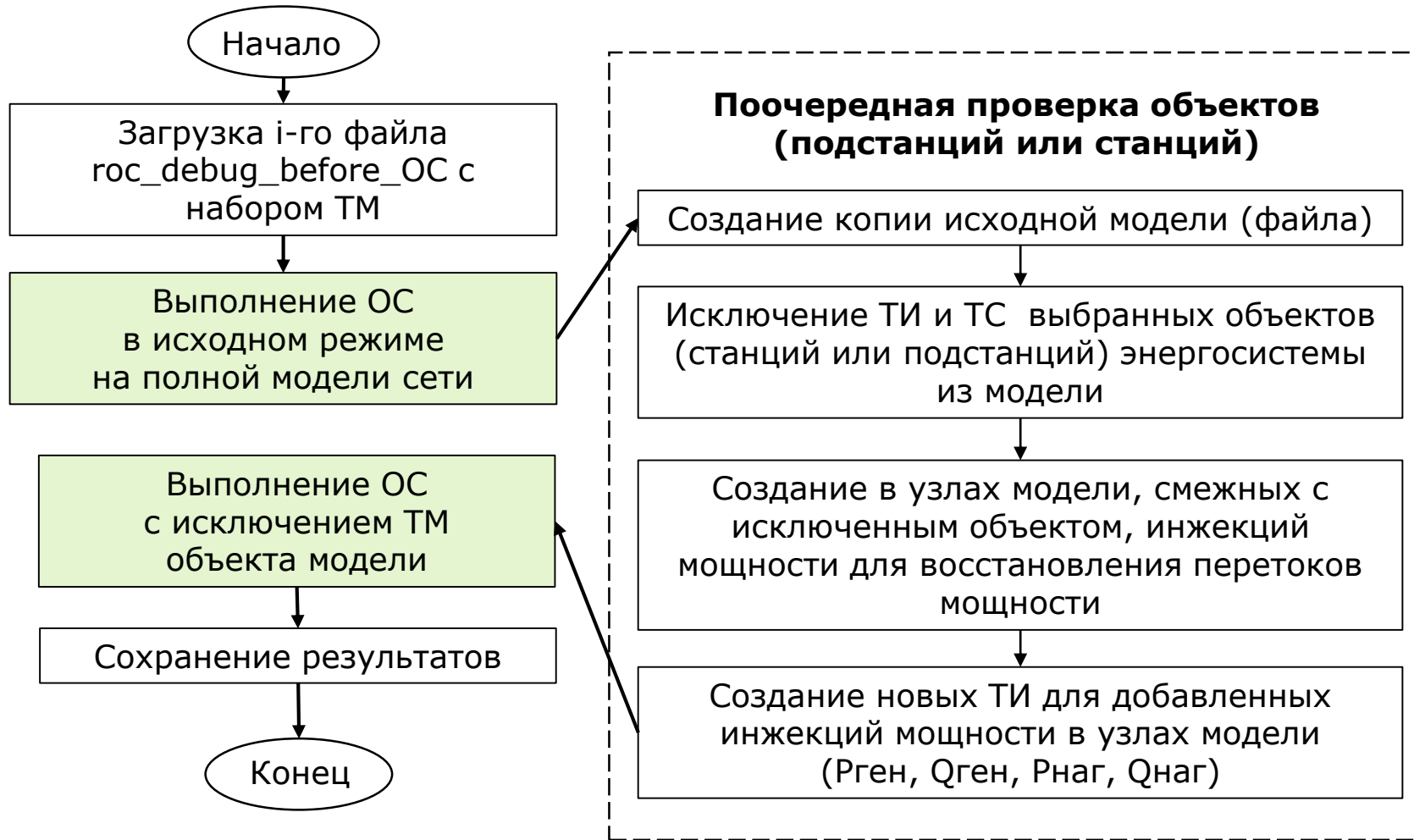


Рисунок 11 – Графическое представление алгоритма

Рисунок 10 – Этапы работы алгоритма поиска причин неуспешного ОС методом поочередного исключения части объектов из модели

КОРРЕКТИРОВКА АЛГОРИТМА №1

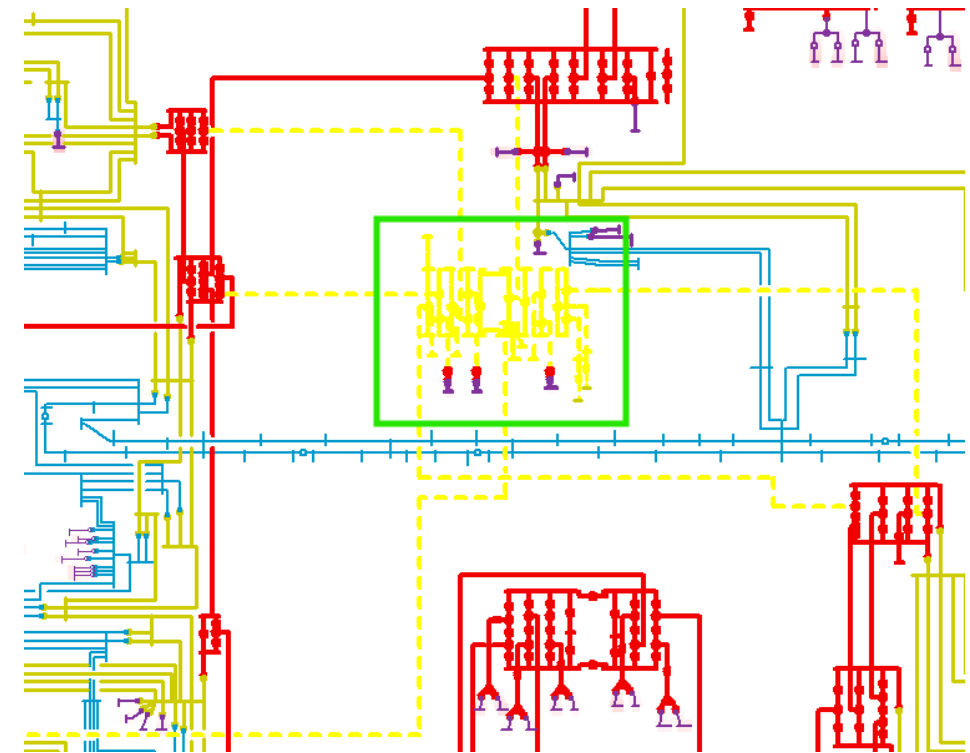
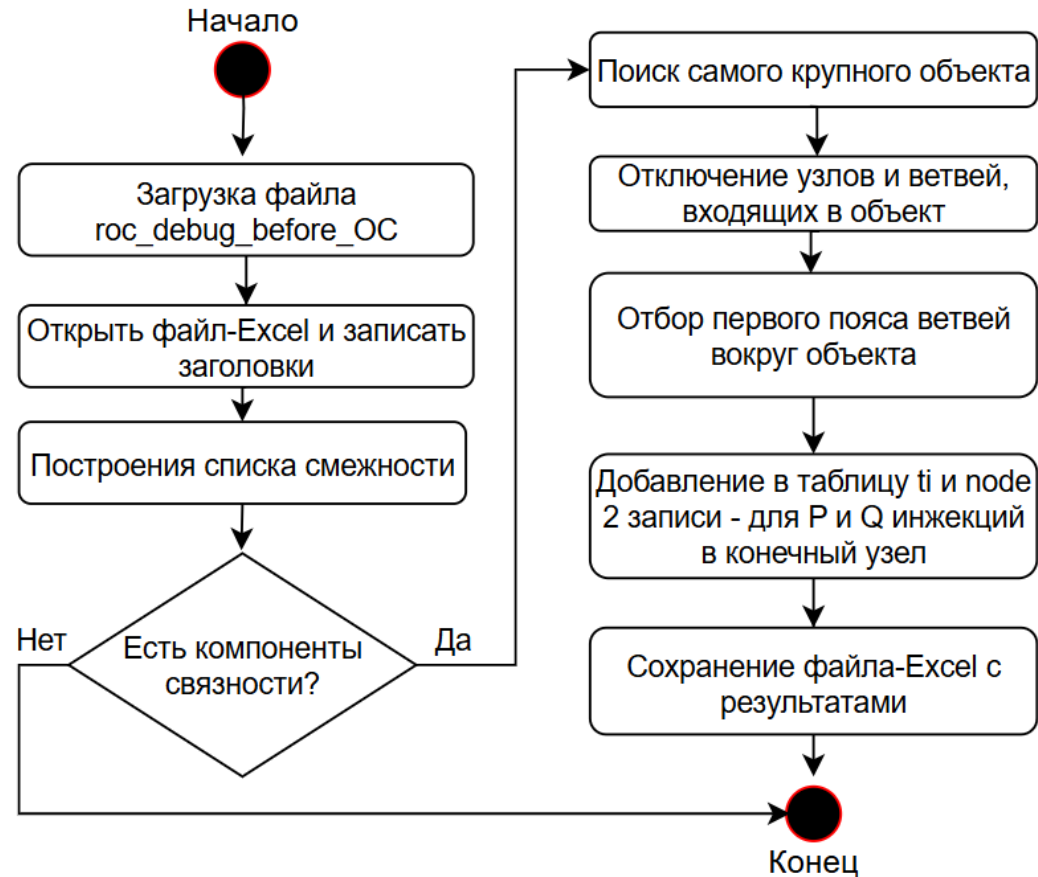


Рисунок 13 – Графическое представление работы скрипта

Рисунок 12 –Блок схема скрипта по отключению узлов и ветвей объектов в сети и добавления эквивалентных инъекций мощности в RastrWin3

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА №1

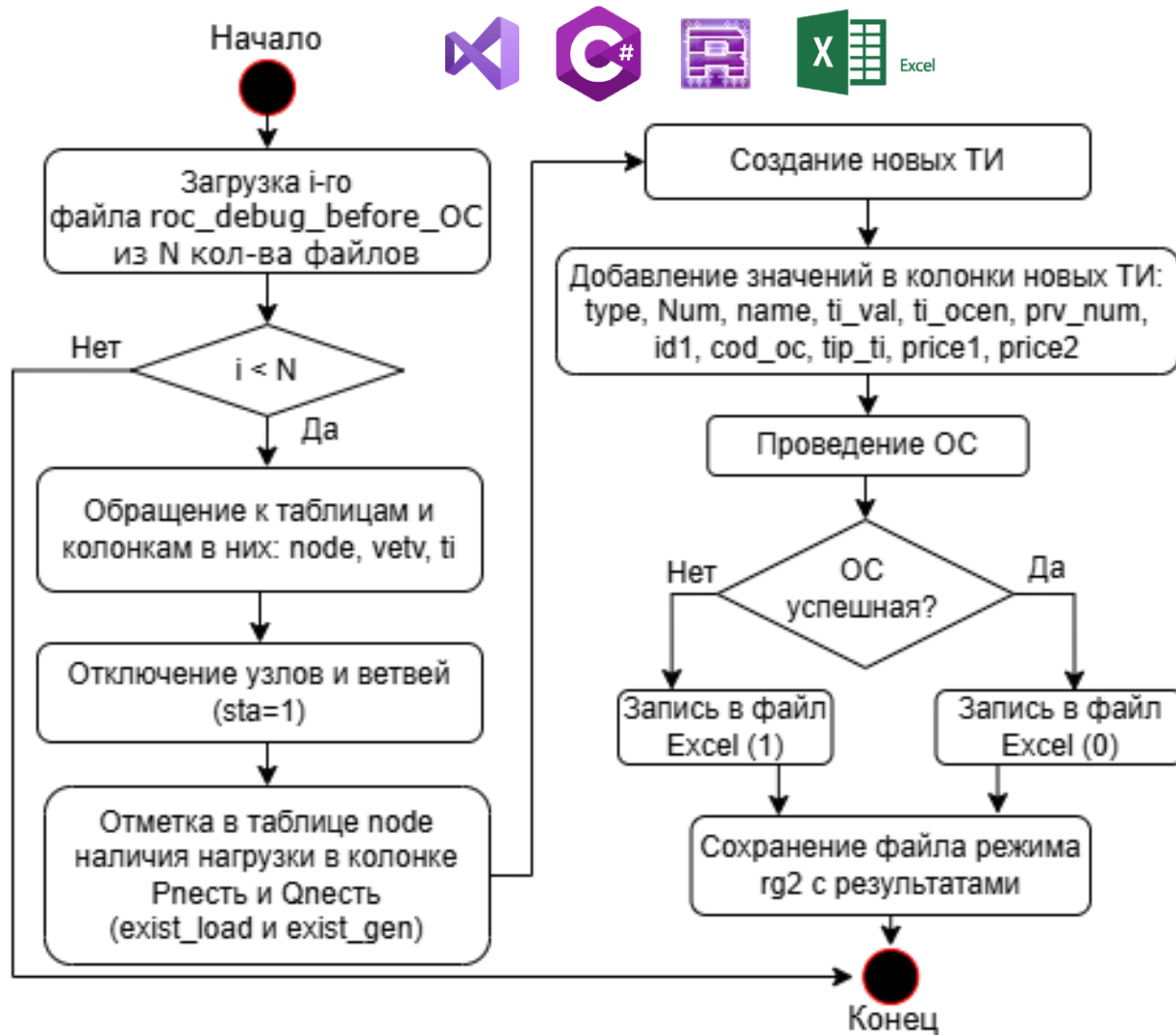


Рисунок 14 – Блок схема для автоматизации опыта по исключению части ПС 500 кВ Ангара в RastrWin3

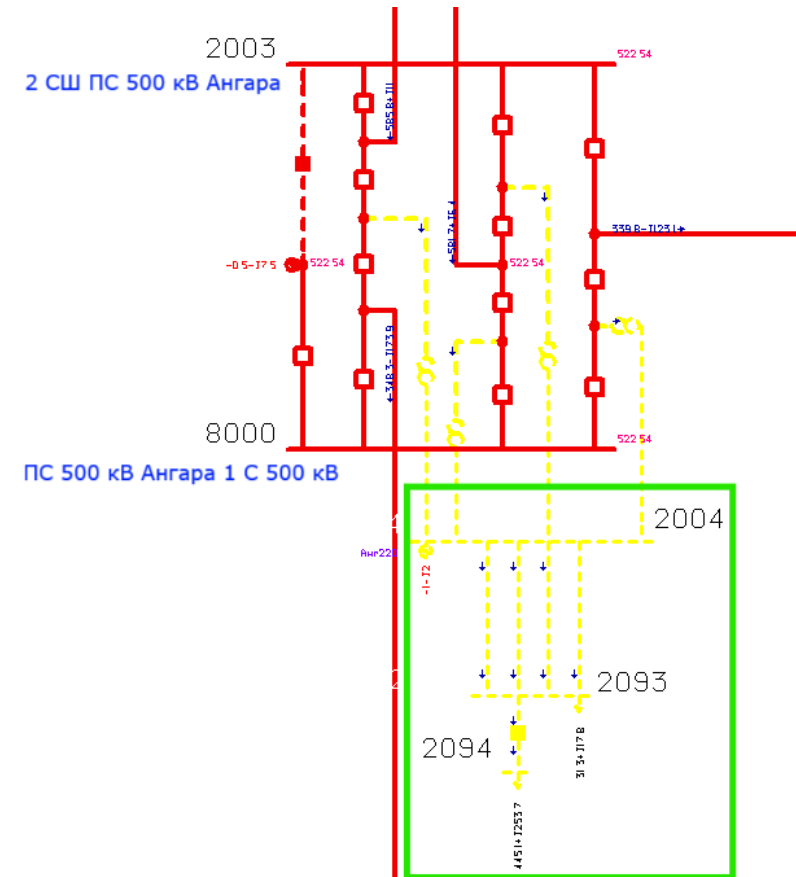


Рисунок 15 – Графическое отображение отключаемой части ПС 500 кВ Ангара

Результат:
снижение вероятности неуспешного ОС с 72% до 15%

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПРИЧИН НЕУСПЕШНОГО ОС НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ МНОЖИТЕЛЯ ЛАГРАНЖА

ОБОБЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА №2

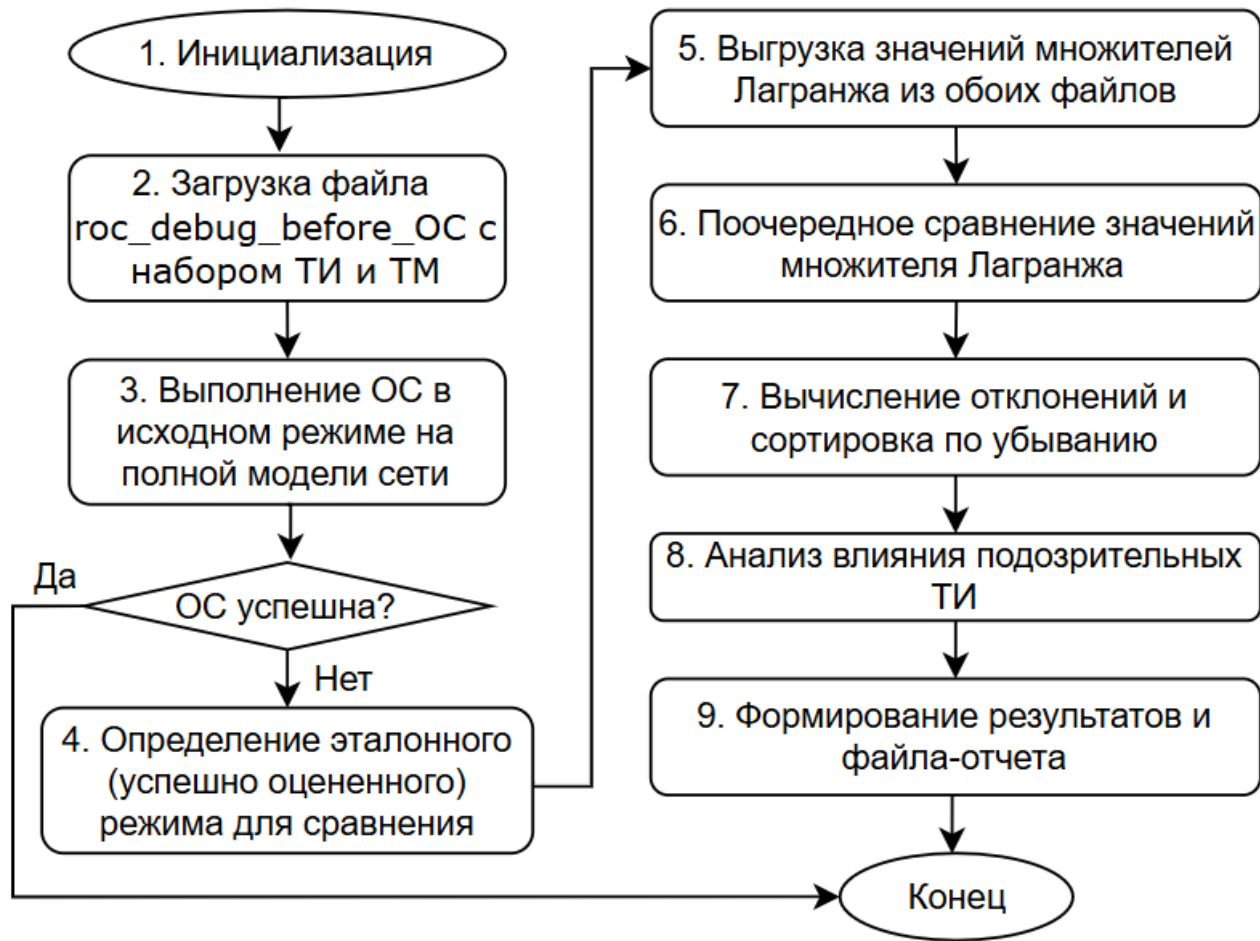


Рисунок 16 – Этапы работы алгоритма поиска причин неуспешного ОС на основе анализа изменения множителя Лагранжа

Пояснение отдельных этапов алгоритма

Этап 4. Из доступных ранее обработанных режимов выбирается последний по хронологии успешный результат ОС.

Этап 6. Для каждого совпадающего канала ТИ вычисляется абсолютное отклонение множителя:

$$\Delta\lambda_i = |\lambda_i^{\text{неусп}} - \lambda_i^{\text{успеш}}|,$$

где $\lambda_i^{\text{неусп}}$ – значение множителя Лагранжа в режиме с неуспешным ОС

$\lambda_i^{\text{успеш}}$ – значение множителя Лагранжа в режиме с успешным ОС.

Этап 9. Создается таблица с результатами:

- параметры ТИ (Num, type, prv_num, id1, id2, id3);
- значения множителей Лагранжа в успешном и неуспешном режиме;
- величина отклонения $|\Delta\lambda_i|$;
- результат ОС при исключении ТИ из оценивания;
- предполагаемый статус (подозрительное/нейтральное);
- рекомендации по проверке оборудования или данных.

Проверка на сценариях с моделированием поступления некорректных ТС «Отключено» с ЛЭП

класса напряжения 500 кВ

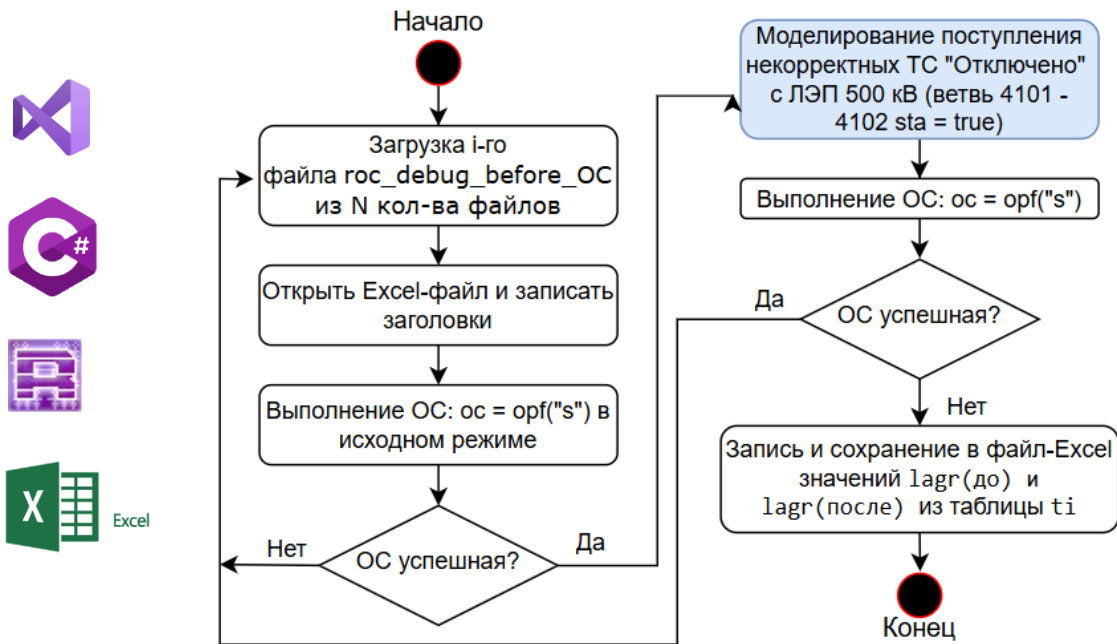


Рисунок 17 – Блок схема для проведения эксперимента

Таблица 4 – Результаты опыта на файле трассировке 00_04_35

Num	Type	prv_num	id1	id2	id3	$\lambda_i^{\text{успеш}}$	$\lambda_i^{\text{неусп}}$	$ \Delta\lambda_i $
34118	ТИ	Ркон	4101	4102	0	13,85	0	13,85
34117	ТИ	Qнач	4101	4102	0	7,92	0	7,92
34119	ТИ	Qкон	4101	4102	0	-5,63	0	5,63
34116	ТИ	Рнач	4101	4102	0	0,00	0	0,00
50267	ТИ	Рнач	3578	3550	0	-9,37	-20,00	10,63
21096	ТИ	Qкон	3578	4034	0	-9,06	-18,65	9,59
21097	ТИ	Ркон	3578	4034	0	-7,07	-15,96	8,89
20910	ТИ	Рнач	3578	4034	0	7,63	16,30	8,67
8147011	ТИ	Tg нагр	919	0	0	-8,89	-0,73	8,16
8147005	ТИ	Tg нагр	572	0	0	-0,02	-7,36	7,34
8147004	ТИ	Tg нагр	571	0	0	-0,01	-7,34	7,33
8147010	ТИ	Tg нагр	584	0	0	-0,04	-7,34	7,30
8147020	ТИ	Tg нагр	2821	0	0	-0,10	-7,34	7,25
8147021	ТИ	Tg нагр	2822	0	0	-0,10	-7,34	7,25
20897	ТИ	Рнач	3575	3577	0	-3,23	-9,93	6,69

Выводы по эксперименту:

- 1) При неуспешной ОС, вызванной некорректными ТС от ЛЭП 4101–4102, соответствующие множители Лагранжа обнуляются после расчёта, хотя до него были ненулевыми.
- 2) Обнуление множителя Лагранжа после изменения режима может служить индикатором некорректных ТИ/ТС и вероятной причины неуспешной ОС.
- 3) В алгоритм необходимо добавить сравнение значений множителей до и после ОС. Переход от ненулевого к нулевому значению следует учитывать как признак проблемной ТМ.
- 4) Такое уточнение повысит точность и оперативность диагностики причин неуспешного ОС.

Проверка на сценариях с моделированием прихода некорректного ТС «отключено» с генераторов

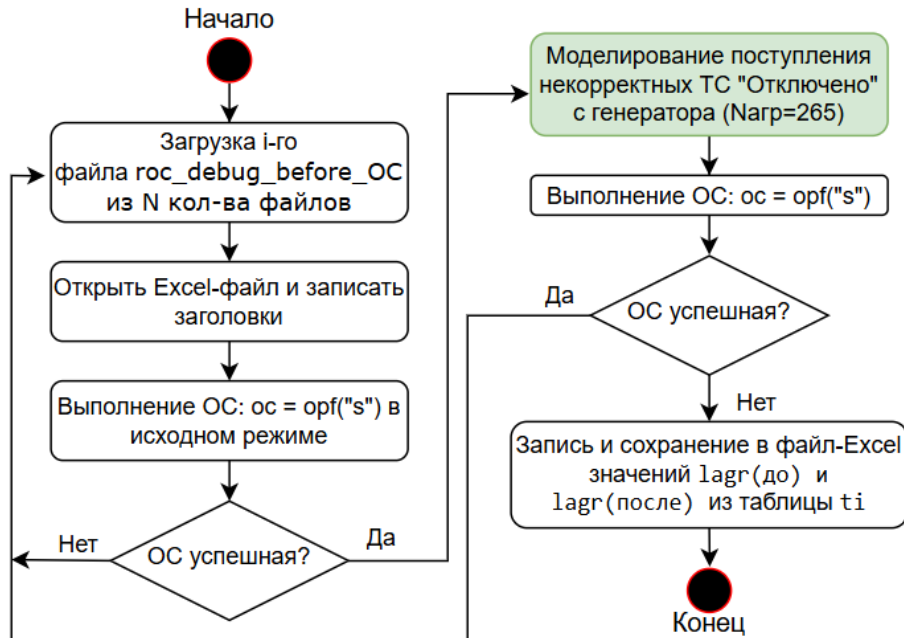


Рисунок 18 – Блок схема для проведения эксперимента

Таблица 5 – Результаты опыта

Num	Type	prv_num	id1	id2	id3	Приход корректного ТС с генератора			Приход некорректного ТС с генератора		
						Знач.	Оцен	$\lambda_i^{успеш}$	Знач.	Оцен	$\lambda_i^{неусп}$
14301	ТИ	Pg_ген-р	265	-	-	110,608	110,608	0,000	7,093	0,000	0,000
14302	ТИ	Qg_ген-р	265	-	-	7,093	7,093	0,000	110,608	0,000	0,000
24854	ТС	сост(Ген.)	265	-	-	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
22782	ТИ	U	718	-	-	120,273	119,792	-0,096	120,273	119,792	-0,096
19903	ТС	сост(Ветвь)	718	796	1	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
17329	ТИ	Pнач	718	796	1	33,141	35,716	0,515	33,141	35,716	0,515
17330	ТИ	Qнач	718	796	1	-20,662	-20,150	0,103	-20,662	-20,150	0,103
19904	ТС	сост(Ветвь)	718	796	2	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
17331	ТИ	Pнач	718	796	2	34,991	35,716	0,145	34,991	35,716	0,145
17332	ТИ	Qнач	718	796	2	-19,770	-20,142	-0,074	-19,770	-20,142	-0,074
26268	ТИ	U	796	0	0	119,929	119,429	-0,100	119,929	119,429	-0,100
19823	ТС	сост(Ветвь)	796	798	1	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
8778	ТИ	Pкон	796	798	1	-30,794	-35,302	-0,902	-30,794	-35,302	-0,902
8779	ТИ	Qкон	796	798	1	-5,962	-7,355	-0,279	-5,962	-7,355	-0,279
918008	ТС	сост(Ветвь)	796	798	2	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000

Итоги эксперимента:

- 1) При моделировании потери ТС с генератора множители Лагранжа, связанные с его ТИ и ТС, не изменяются.
- 2) Изменения множителей для остальных генераторов оказались незначительными, несмотря на ожидаемое перераспределение мощности.

Вывод:

Исходя из полученных результатов, требуется провести дополнительный анализ и выяснить причины отсутствия изменения множителей Лагранжа.

Выявление узлов с признаком существования нагрузки без каналов ТМ Рнаг/Qнаг

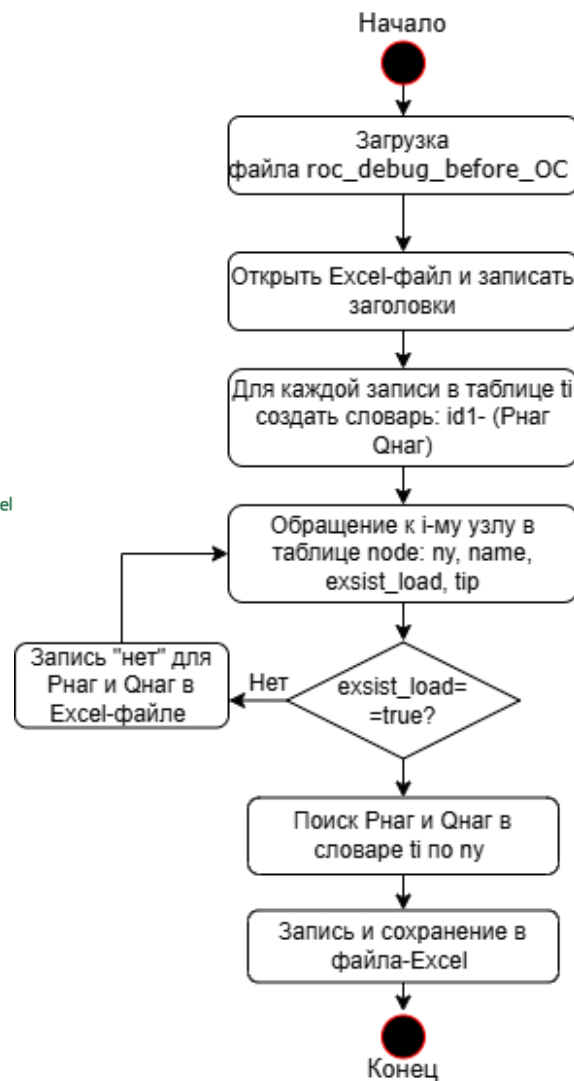


Таблица 6 – Результаты исследования

Название	Узлы с признаком существования нагрузки без каналов ТМ Рнаг/Qнаг	Узлы с признаком существования нагрузки без каналов ТМ Рнаг/Qнаг, относящиеся к электрическим станциям	Узлы с признаком существования нагрузки и с каналами ТМ Рнаг/Qнаг
Кол-во	564	92	18

Вывод:

На основе дополнительного анализа сценариев с потерей ТС генераторов установлено, что в ряде случаев существенное влияние на поведение режима оказывает нагрузка в узлах с признаком существования Рнаг/Qнаг, не охваченных каналами ТИ и ТС.

Требуется внесение соответствующих корректировок в алгоритм.

Рисунок 20 – Блок схема для сбора информации по нагрузкам

КОРРЕКТИРОВКА АЛГОРИТМА №2

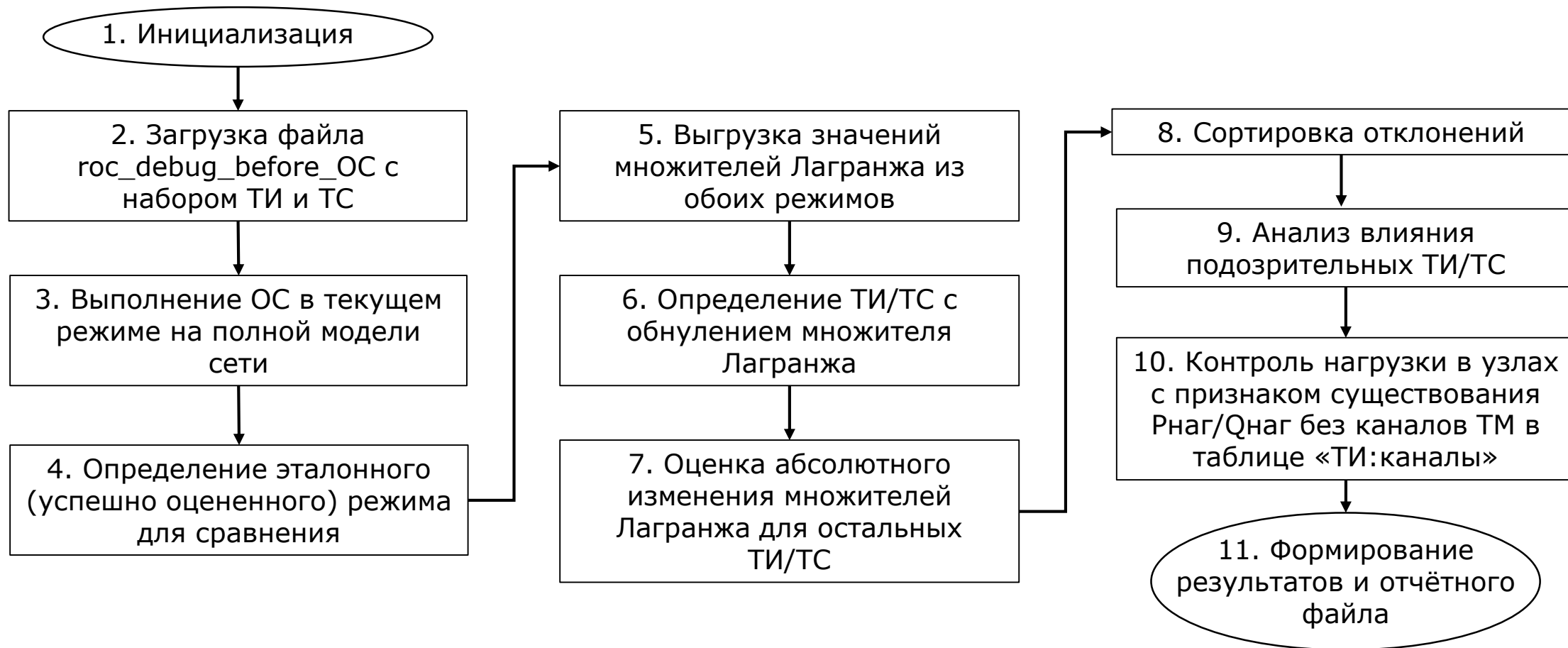


Рисунок 21– Этапы работы алгоритма поиска причин неуспешного ОС на основе анализа изменения множителя Лагранжа

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА №2

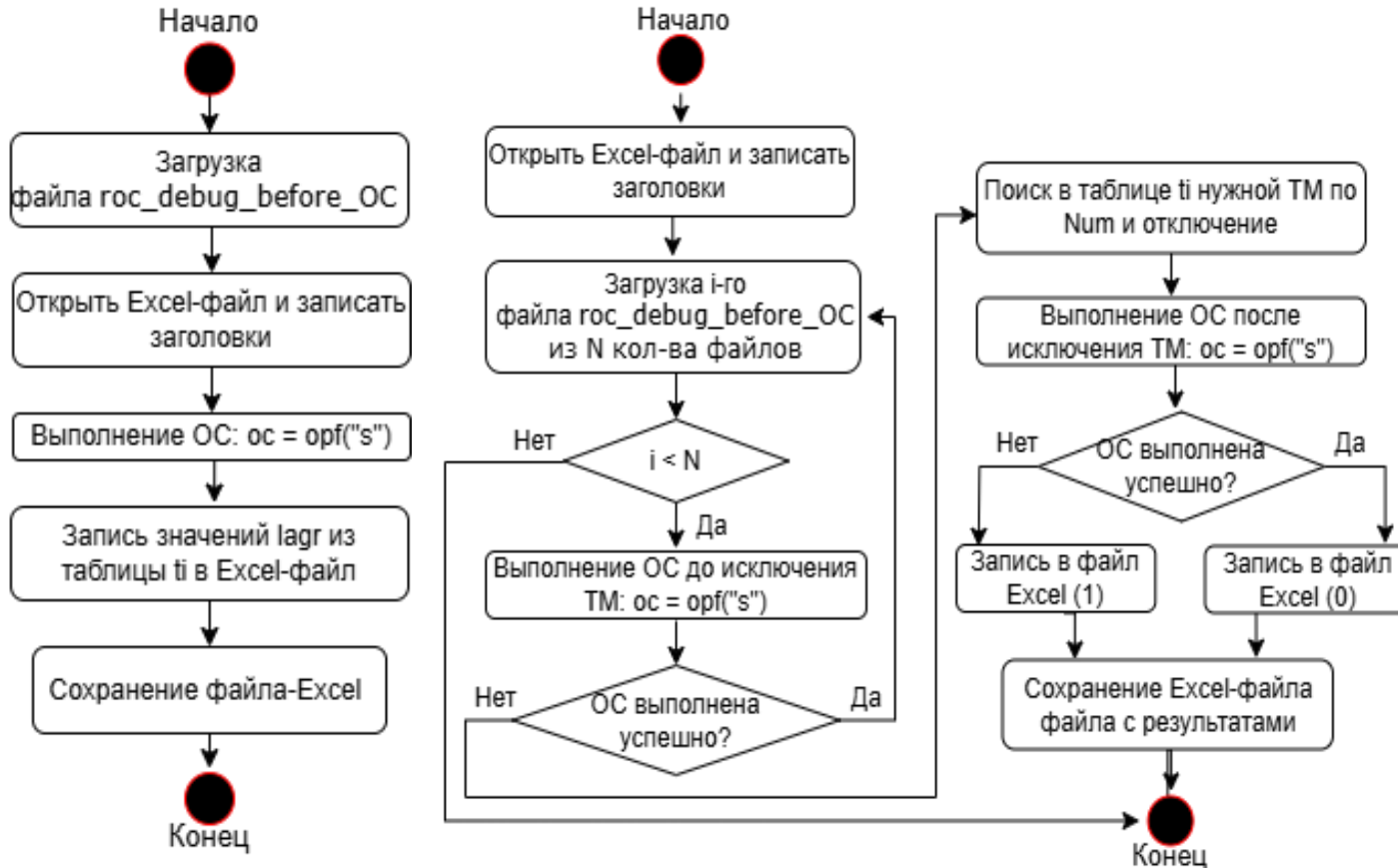


Рисунок 22 – Блок схемы для апробации алгоритма №2

Таблица 7 – Результаты апробации

Название файла трассировки					00_07_19	00_08_43	Δλ _i
ОС в исходном режиме					успешное	неуспешное	
Num	type	prv_num	id1	id2	lagr	lagr	
3345003	ДТИ	Рген	3345	0	20,00	-20,00	40,00
34120	ТИ	Ркон	4103	4101	15,60	0,00	15,60
2958	ТИ	U	918	0	-4,46	-20,00	15,54
18137	ТС	сост(Ветвь)	4010	4011	-12,45	0,00	12,46
1650008	ДТС	сост(Ветвь)	3084	3330	-3,57	8,56	12,13

Таблица 8 – Результаты анализа влияния на ОС подозрительной ТМ

№ ТИ/ТС	Тип	Вероятность неуспешного ОС до	Вероятность неуспешного ОС после
34120	ТИ	1	0,120
2958	ТИ	1	0,199
3345003	ДТИ	1	0,265
18137	ТС	1	1,000
1650008	ДТС	1	1,000

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН НЕУСПЕШНОГО ОС

Таблица 7 - Сравнительная характеристика алгоритмов

Критерий	Метод поочерёдного исключения		Метод анализа множителей Лагранжа	
	Оценка	Пояснения	Оценка	Пояснения
Точность локализации	Средняя	Локализует проблемный объект, но требуется дополнительный анализ ТИ объекта	Высокая	Позволяет прямо выявить проблемные ТИ и ТС
Скорость работы	Низкая	Требуется многократное повторное оценивание состояния	Высокая	Достаточно одной-двух оценок с анализом множителей
Автоматизация	Средняя	Сложнее автоматизировать процесс восстановления перетоков	Высокая	Автоматизированы почти все этапы на сегодня
Диагностика конкретных ТИ/ТС	Нет	Локализует только объекты схемы на сегодня	Да	Прямо указывает на проблемные измерения
Устойчивость к множественным ошибкам	Ниже	Перекрывающиеся ошибки могут скрывать друг друга	Выше	Сравнительный анализ режимов помогает выделить истинные ошибки
Требования к вычислительным ресурсам	Высокие	Многократные запуски ОС требуют ресурсов и времени	Низкие	Две оценки с последующим анализом
Интерпретируемость результатов	Высокая	Понятно, какой объект исключён и как это влияет	Средняя	Требует экспертного анализа множителей
Применимость к большим системам	Ограничена	Рост числа объектов сильно увеличивает время анализа	Хорошая	Быстро обрабатывает даже большие модели
Возможность интеграции с другими методами	Средняя	Требует дополнительных данных для автоматизации	Высокая	Множители легко включаются в комплексные алгоритмы

Заключение

- ✓ Сформированы тестовые наборы файлов трассировки с типовыми причинами неуспешного ОС.
- ✓ Предложены два алгоритма выявления причин неуспешного ОС:
 - путём поочередного исключения части объектов схемы из модели
 - на основе анализа изменения множителя Лагранжа
- ✓ Выявлены особенности в работе каждого алгоритма, проведена их корректировка для повышения точности их работы.
- ✓ Реализована автоматизация отдельных этапов работы алгоритмов в среде RastrWin3 с использованием скриптов на C#.
- ✓ Проведена апробация на реальных данных, подтверждена работоспособность методов.

Дальнейшее развитие работы: разработка ПО для выявления причин неуспешного оценивания состояния системы мониторинга запасов устойчивости

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Методики определения причин неуспешного оценивания состояния

Авторы:

Тайдонова Анастасия Михайловна – студентка ИШЭ ТПУ
Васильев Алексей Сергеевич – к.т.н, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ
Вагапов Никита Ринатович – заместитель начальника СЭР,
АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири