Демо-версия: **www.grid-in.com**

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «GRID-IN»

Краткое общее описание

(ver. 1.1 от 14.11.2021 г.)

СОДЕРЖАНИЕ:

1. Общие положения 2
2. Функции ПК 2
3. Место установки ПК и пользователи 2
4. Область применения ПК 3
5. Состав ПК 4
6. Эмулятор сети 5
7. Расчётный модуль 6
8. Учёт зависимости сопротивления провода от тока и температуры окружающей среды 7
9. Обнаружение и локализация безучётного потребления (БУП) 8
10. Идентификация фаз нагрузок 9
11. Качество и достаточность исходных данных 9
12. Этапы работы с ПК 10
13. Аналоги разработки и соображения по интеграции ПК «GRID-IN» с ADMS диспетчерских центров 11
14. Ноу-хау 11
15. Текущее состояние и задачи разработки ПК 11

СОКРАЩЕНИЯ:

ADMS	–	Advanced Distribution Management Solutions (усовершенствованная система управления распределительными сетями)
АРМ	–	Автоматизированное рабочее место (компьютер)
АСКУЭ	–	Автоматизированная система коммерческого учёта электроэнергии
БУП	–	Безучётное потребление
ВЛ	–	Воздушная линия
ИИ	–	Искусственный интеллект
КЛ	–	Кабельная линия (подземная прокладка)
НН	–	Низкое напряжение (0,4 кВ)
ПК	–	Программный комплекс
СИ	–	Средство измерений
СШ	–	Секция шин
ТП	–	Трансформаторная подстанция
ЦБГ	–	Цифровая балансовая группа
ЦОД	–	Центр обработки данных
ЦУ	–	Целеуказание
ЦФ	–	Целевая функция
ЭСО	–	Электросетевая организация
ЭЭ	–	Электроэнергия

1. Общие положения

На сети низкого напряжения (НН 0,4 кВ) приходится немногим менее половины всех потерь электроэнергии (ЭЭ) в энергосистеме. Вместе с тем, сети НН недоступны для оперативного мониторинга. В подавляющем большинстве современных систем управления распределительными сетями ADMS, конечным элементом наблюдения является трансформаторная подстанция ТП 6(10)/0,4 кВ. При этом, в России активно внедряются автоматизированные системы коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ). Полную замену существующих приборов учёта ЭЭ на смарт-счётчики с цифровым интерфейсом связи планируется завершить к 2030 году.

Программный комплекс (ПК) «GRID-IN» разработан с целью создания – на основе существующих АСКУЭ – полнофункциональной системы мониторинга сетей НН, без необходимости внедрения каких-либо дополнительных технических средств, включая средства измерений (СИ). Такой подход позволяет организовать распределённые вычисления с любым масштабированием, без крупных единовременных затрат на создание центров обработки данных (ЦОД).

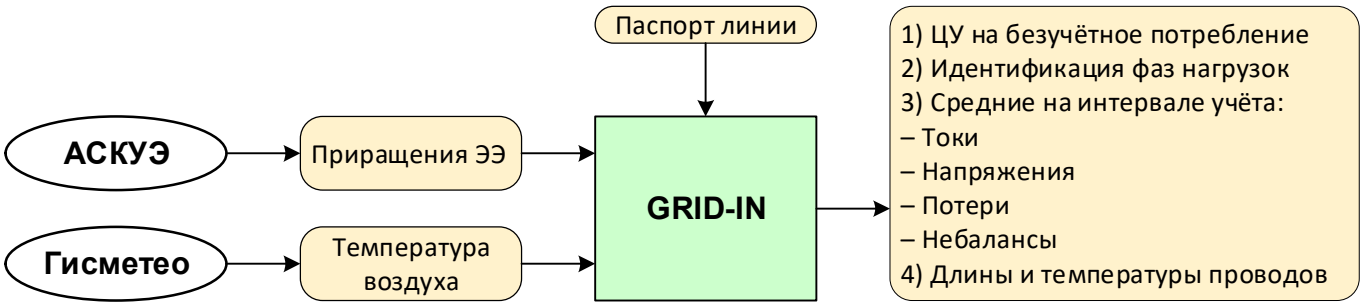


Рис.1: *Входные и выходные данные ПК*

2. Функции ПК

Функционал ПК «GRID-IN» разбит на три (в значительной степени – самостоятельных) группы:

1) Обнаружение и локализация точек сети с безучётным потреблением (БУП)

2) Идентификация фаз нагрузок

3) Оперативный, поэлементный расчёт следующих основных параметров сети:
– фактические текущие общие потери;
– технически-обоснованные потери (какими они должны быть при текущих нагрузках и метеоусловиях);
– структура потерь;
– текущие токи, их плотности (А/мм^2) в участках сети и их отношение к длительно-допустимым значениям;
– напряжения на нагрузках и в узлах сети;
– текущие температуры проводов;
– длины участков сети.

3. Место установки ПК и пользователи

ПК «GRID-IN» может быть инсталлирован на АРМ, который имеет сетевой доступ к серверу локальной АСКУЭ.

При отсутствии непосредственной связи с АСКУЭ доступен облачный сервис.

В ближайшей перспективе планируется создание интеллектуального контроллера, устанавливаемого непосредственно на ТП-0,4 кВ.

Пользователями ПК могут быть специалисты служб транспорта ЭЭ электросетевых организаций (ЭСО), непосредственно заинтересованных в снижении технических и коммерческих потерь ЭЭ.

4. Область применения ПК

ПК «GRID-IN» применим там, где уже внедрены локальные системы АСКУЭ с полностью сформированными цифровыми балансовыми группами (ЦБГ).

ЦБГ – это замкнутое множество приборов учёта, по показаниям которых за любой интервал времени можно метрологически-точно вычислить разницу:

НЕБАЛАНС = ПРИЁМ В СЕТЬ – ПОЛЕЗНЫЙ ОТПУСК

Небаланс имеет три (и только три) слагаемых:

- Погрешность измерений;
- Технически-обоснованные (физические) потери ЭЭ;
- Безучётное потребление.

Например: имеем типичную сеть НН 0,4 кВ, представленную на линейной (поопорной) схеме (фрагмент из паспорта линии):

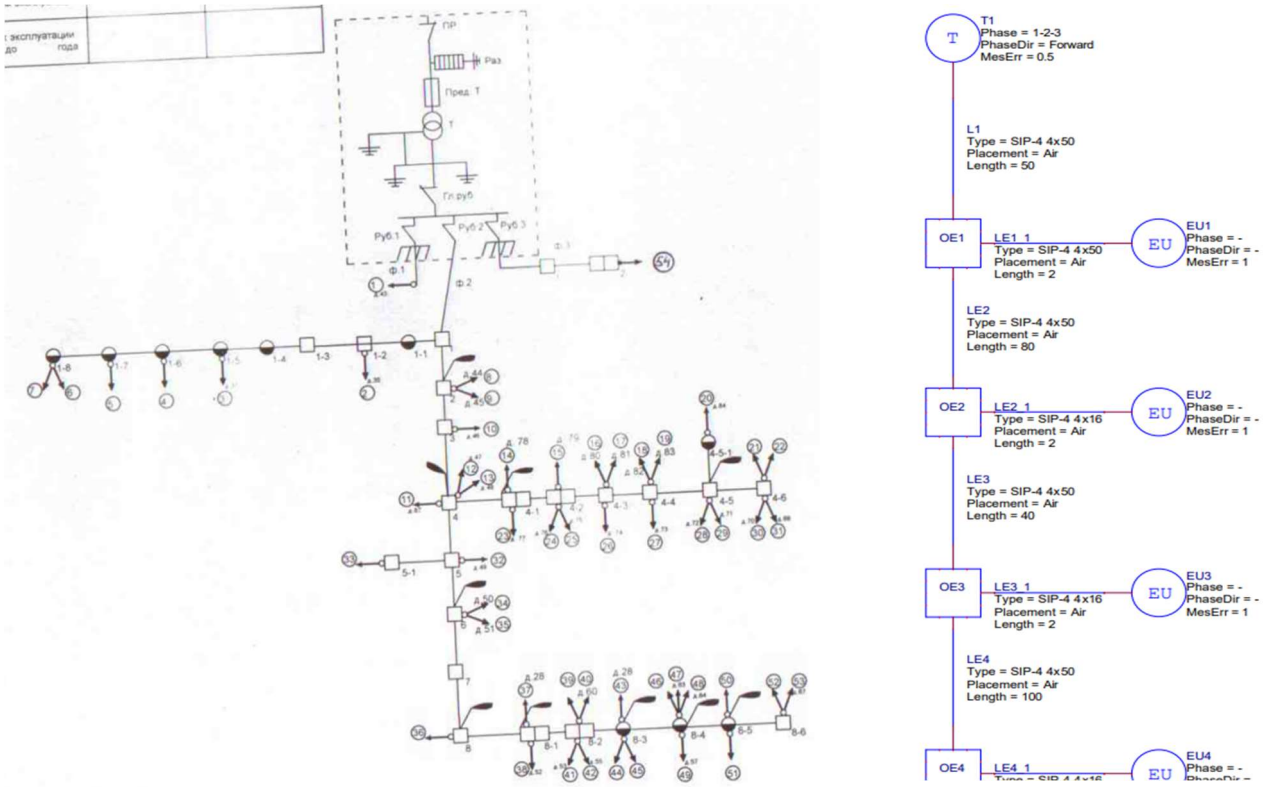


Рис.2: *Пример объекта мониторинга для ПК «GRID-IN»*

Цифровые приборы учёта обозначены кружками с цифрами (кодами точек учёта).

На питающей трансформаторной подстанции должен быть установлен балансовый прибор учёта, желательно с функцией контроля напряжения СШ-0,4 кВ. При отсутствии значения среднего напряжения используется его номинал и оценки токов будут немного смещёнными.

У потребителей электроэнергии должны быть установлены приборы учета, которые по цифровым каналам связи предоставляют в АСКУЭ (периодически или по запросу – согласно установленному протоколу обмена) следующую информацию с метками времени:

Обязательная информация:	Желательно:
Активная энергия (общая по 3-фазной системе)	Реактивная энергия
	Чередование фаз счётчика

Для идентификации фаз и точного пофазного расчёта всех режимов сети, нарастающие итоги ЭЭ должны предоставляться:

- по всем входам (L1, L2, L3) счётчиков;
- в прямом (потребление) и обратном (генерация) направлениях.

Для ПК из АСКУЭ должен быть обеспечен доступ к историческому массиву измерительной информации (профилям нагрузок).

5. Состав ПК

ПК «GRID-IN» состоит из следующих взаимосвязанных программных модулей:

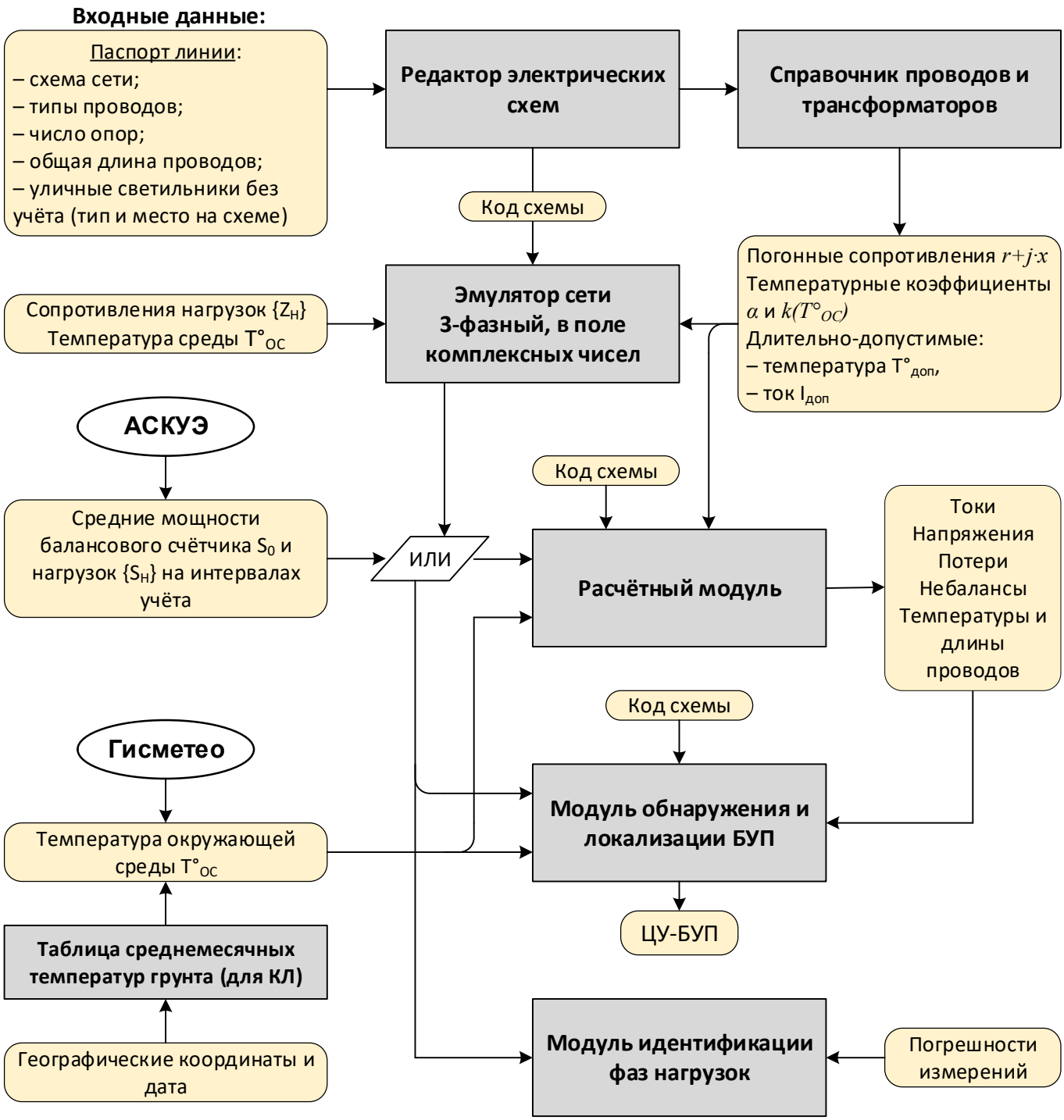


***Рис.3**: Состав ПК*

6. Эмулятор сети

В состав ПК «GRID-IN» входит программный модуль эмулятора 3-фазной сети, основанный на строгих законах электротехники, с учётом реактивностей сопротивлений проводов и нагрузок (расчёты в поле комплексных чисел) и зависимости активных сопротивлений линий от протекающего тока и температуры окружающей среды.

Назначение модуля:

- Моделирование режимов и расчёт параметров сети, введённой в редактор электрических схем;
- Тестирования и исследования модулей, работающих с реальными данными;
- Генерация недостающих или замена недостоверных данных.

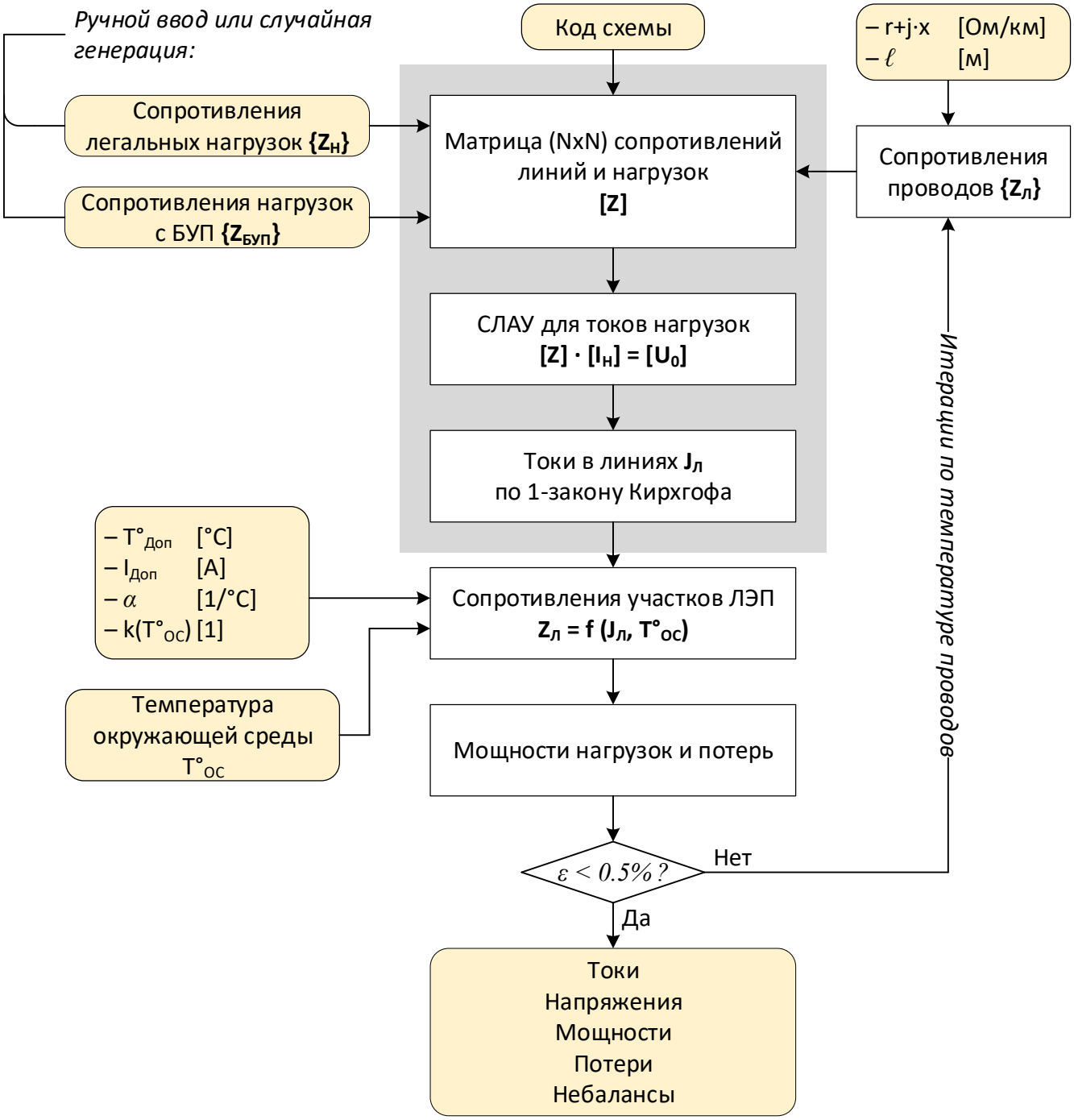


Рис.4: *Эмулятор*

7. Расчётный модуль

В силу ряда причин (рассинхронизации времени счётчиков с системным, отсутствием в функционале счётчиков расчёта/хранения средних – на заданных временных интервалах – значений токов и напряжений, экономия трафика и т. п.) – напряжения и токи нагрузок из АСКУЭ недоступны. Поэтому, в ПК «GRID-IN» осуществляется их расчёт численными методами оптимизации. Выбран метод Хука-Дживса, показавший хорошую сходимость: для сети из 60 нагрузок (число неизвестных переменных целевой функции) время поиска не превышает нескольких секунд и обеспечивается точность не хуже 1,5%.

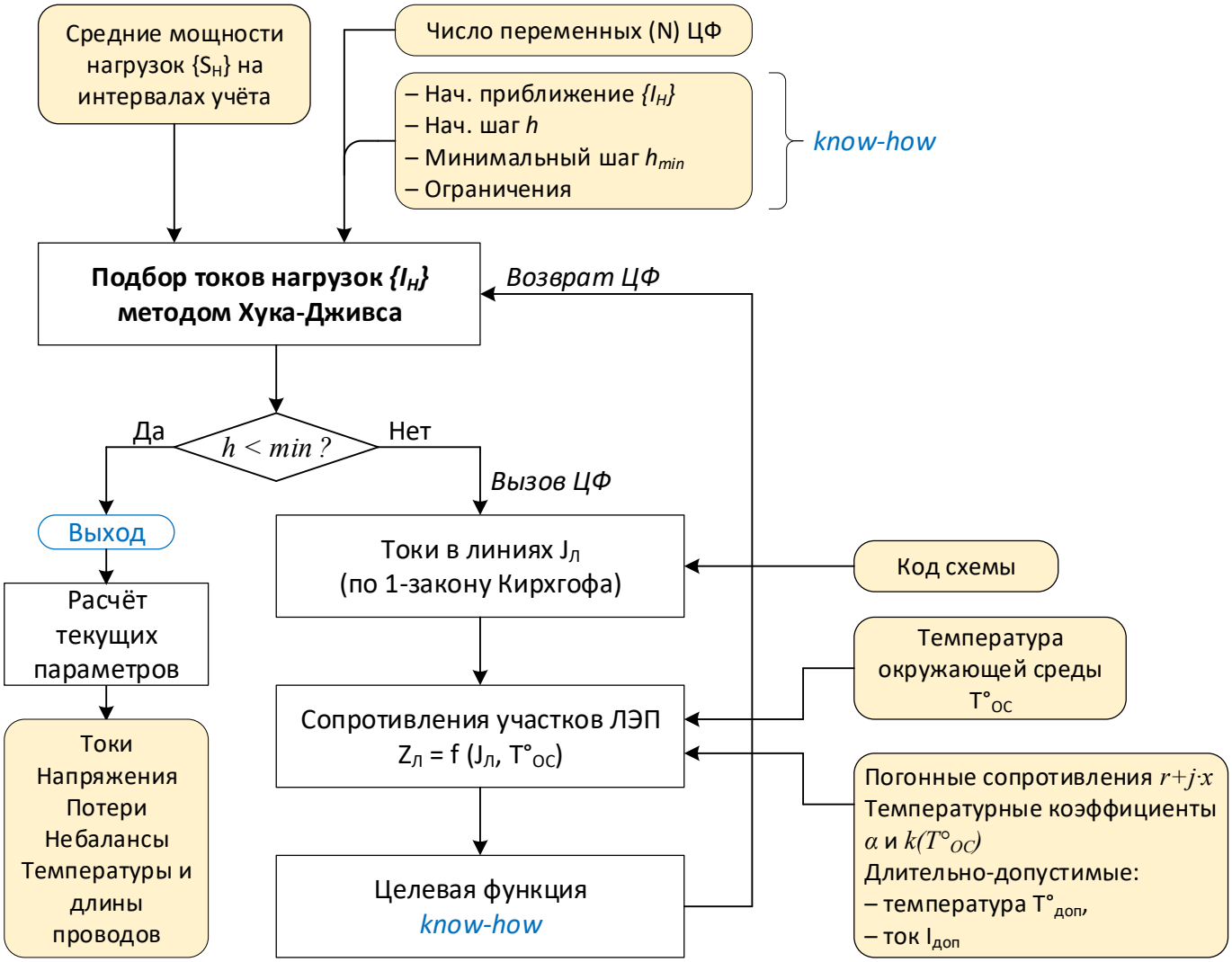
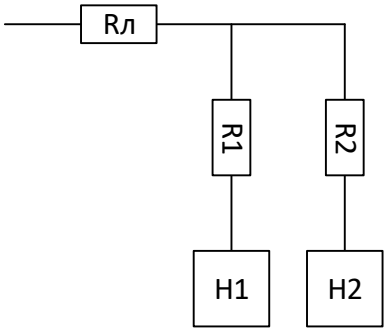


Рис.5: *Расчётный модуль*



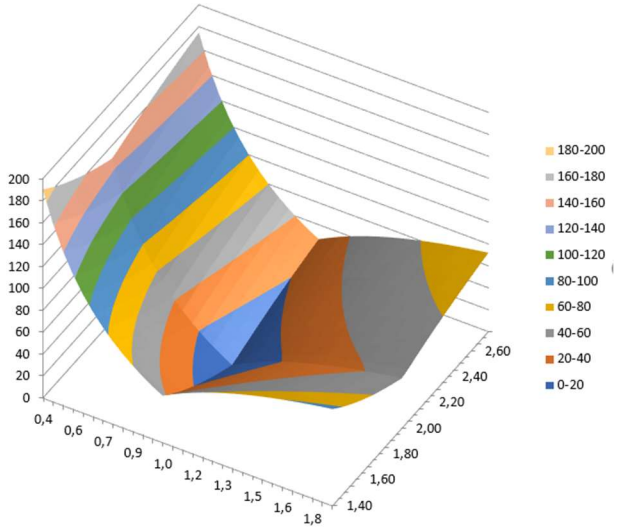


Рис.6: *Вид ЦФ (справа) для схемы из двух нагрузок (слева)*

8. Учёт зависимости сопротивления провода от тока и температуры окружающей среды

В ПК «GRID-IN» всё расчёты производятся с учётом указанной зависимости.

Активное сопротивление провода зависит от его температуры, которая, в основном, определяется протекающим током и температурой окружающей среды. В ПУЭ (табл. 1.3.3) и в технической документации на провода, приводятся соответствующие таблицы поправочных коэффициентов. Так, для определения величин длительно-допустимых токов алюминиевых изолированных и неизолированных проводов, при температурах окружающей среды, отличающихся от условно-нормированной, следует применять значения:

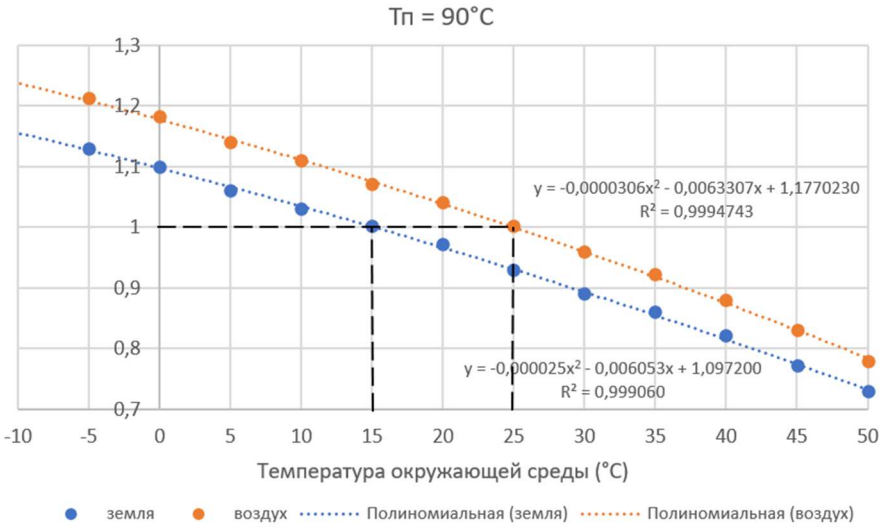


Рис.7: *Зависимость поправок для допустимых токов от температуры окружающей среды (Значению «1» соответствуют: 15°С – для прокладки в земле, 25°С – для воздуха).*

В ПК «GRID-IN» используется упрощенная методика, основанная на линеаризации нелинейной и неявной зависимости температуры провода $T^{\circ}_{п}$ от протекающего тока и температуры окружающей среды:

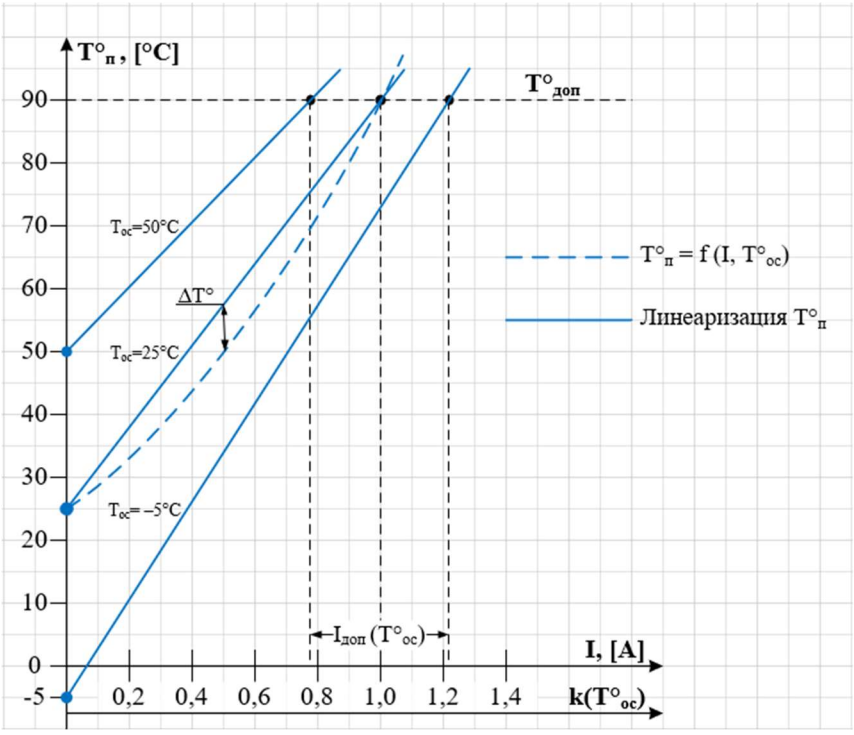


Рис.8: *Номограмма* $T_{п} = f(I, T_{ос})$

Как показывают расчёты, максимальное отклонение ΔT° линеаризации не превышает 7°С, что приводит к приемлемой дополнительной погрешности расчёта сопротивления алюминиевого провода – не более 2,8% в диапазоне рабочих условий эксплуатации.

Для учёта солнечной радиации и ветра можно предложить установку на ТП недорогих метеоящиков.

9. Обнаружение и локализация безучётного потребления (БУП)

Типичная картина небаланса в ЦБГ выглядит так:

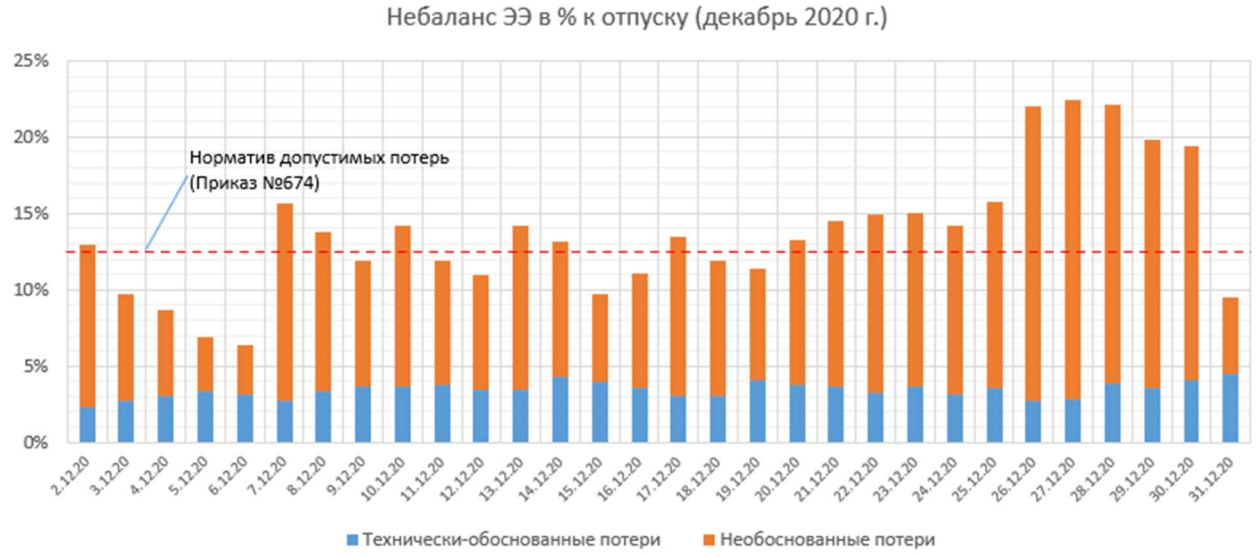


Рис.9: *Пример соотношения потерь и их нормативов в сети НН (из реальной ЦБГ для ТП-0,4 кВ)*

В настоящее время известны два подхода к решению данной проблемы:

- Инструментальный контроль напряжений в узлах сети*;
- Экспертная оценка профилей нагрузок с применением искусственного интеллекта (ИИ)**.

См., например:
*) *Способ выявления неконтролируемого потребления электроэнергии в электрической сети 0,4 кв (findpatent.ru)*
**) *http://eepir.ru/images/news/010721/9.pptx*

Контроль напряжений требует дополнительных затрат на инструментально-техническое обеспечение и ограничен синхронностью и точностью их измерений. Так, для локализации точки БУП с точностью до 1 пролёта между соседними опорами (40-50 м), при токе нелегальной нагрузки 5 А (≈1 кВт), в проводе СИП-4 4х50 необходимо зафиксировать падение напряжения менее чем в 0,16 В, т.е. с точностью не хуже 0,075%, что относится к довольно прецизионным измерениям.

Локализация БУП на основе технологий ИИ пока не обеспечивает приемлемой достоверности ЦУ (менее 50%), а также требует значительных вычислительных затрат и обучения нейросети.

В ПК «GRID-IN» факт БУП фиксируется сравнением суммы рассчитанных токов нагрузок с вычисленным по показаниям балансового счётчика средним (на временном интервале) значением тока головного участка. При этом, регистрируется ненулевой токовый небаланс, противоречащий 1-закону Кирхгофа.

Для локализации точек схемы с БУП и выработки целеуказания (ЦУ) на их инструментальную проверку, в ПК «GRID-IN» используется оригинальный алгоритм, основанный на вычислении температуро-независимой метрики, которая рассчитывается на основе массива измерительной информации необходимой глубины и априорных данных о типах проводов и схеме сети.

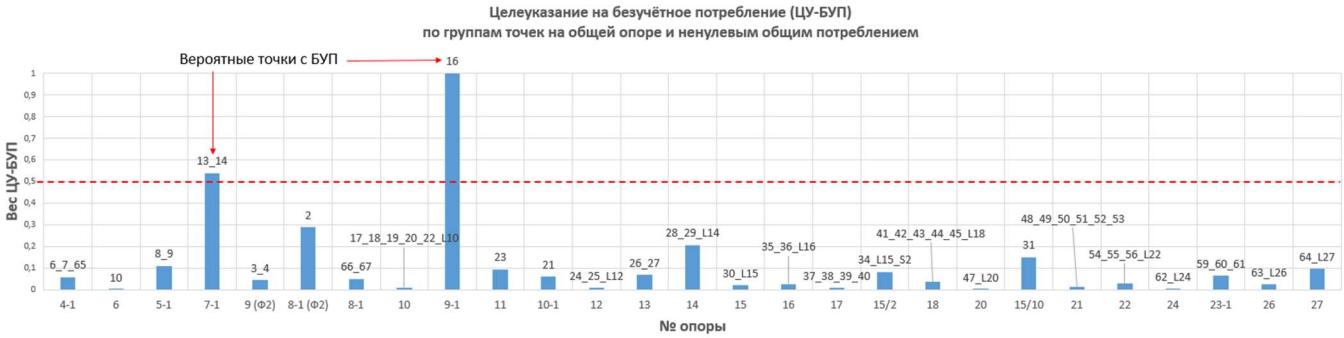


Рис.10: *Диаграмма ЦУ-БУП**

Необходимо отметить, что указанная методика критична к точкам с нулевыми (или близкими к нулевым) профилями потребления.

**Сформировано и подтверждено на реальных данных, полученных в неофициальном порядке.*

10. Идентификация фаз нагрузок

Оптимальное распределение нагрузок по фазам питающего фидера является необходимым условием для улучшения симметрии 3-фазной сети и снижения потерь в нейтрали. Строгий, пофазный расчёт потерь и режимных параметров сети НН предполагает точное знание к какой фазе ЛЭП подключен конкретный абонент. Априорная информация о соответствии входов (L1, L2, L3) абонентских 3-фазных и однофазных счётчиков конкретной фазе (A, B, C) распределительной сети НН – отсутствует.

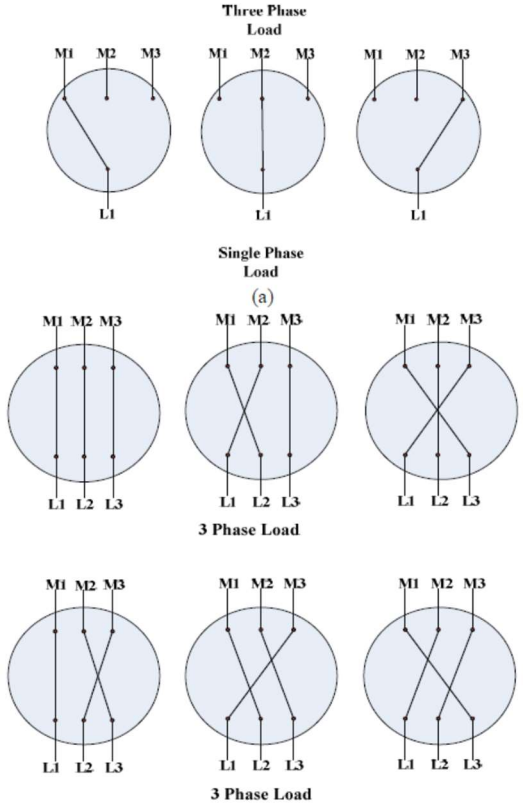


Рис.11: *Варианты фазировки**

**Источник:*
https://www.researchgate.net/publication/261115162_Consumer_phase_identification_in_a_three_phase_unbalanced_LV_distribution_network

Количество возможных подключений трех входов счётчика к трем фазам сети равно шести. Для двух счётчиков каждому из шести подключений одного из них – может соответствовать шесть подключений второго счётчика, т. е. число вариантов подключений составит $6^2 = 36$. Обобщая расчёт на случай произвольного числа счётчиков N, будем иметь возможное число сочетаний: 6^N.

Если задать время на выполнение одной операции перестановки условным значением в 1 мкс, то уже для 15 счётчиков в линии 0,4 кВ, мы получим затраты времени на все перестановки более 130 часов или 5 суток. Это неприемлемо, учитывая, что число счётчиков в ЦБГ может составлять несколько десятков.

Обладая информацией о чередовании фаз счётчиков, можно сократить максимальное число всех возможных перестановок с 6^N до 3^N, т. е. в 2^N раза. При таком сокращении, за 1 час уже можно перебрать все возможные перестановки для 20 счётчиков, что заметно больше, но тоже недостаточно.

Кардинальное сокращение числа перестановок достигается методом максимального правдоподобия. Суть метода состоит в том, что перестановки производятся не простым перебором, а в порядке очерёдности, определяемой наибольшим коэффициентом корреляции между числовыми рядами фазных показаний счетчиков нагрузок и балансового счётчика.

Критерий завершения перебора фаз является решением нетривиальной задачи и зависит от погрешностей измерений и долей нагрузок в их сумме.

Идентификация фаз нагрузок:			
Фидер	A	B	C
Счётчик №1	L1	L2	L3
Счётчик №2	L1	L3	L2
Счётчик №3	L2	L1	L3
Счётчик №4	L2	L3	L1
Счётчик №5		L1	
Счётчик №6			L1

Важно отметить, что точность идентификации фаз существенно зависит от наличия в сети точек с БУП.

11. Качество и достаточность исходных данных

При наличии достаточных и достоверных исходных данных, с помощью «GRID-IN» можно:

1) Увеличить вероятность правильного ЦУ-БУП вплоть до 100%;
2) Осуществить идентификацию фаз абонентов (для их последующего оптимального перераспределения по фазам сети, с целью улучшения симметрии 3-фазной системы);
3) Уточнить и структурировать технически-обоснованные потери для каждого интервала времени и за период в целом.

<u>ВАЖНО</u>: Данные являются достаточными, если число интервалов времени (отсчётов, срезов) в профилях потребления больше, чем сумма числа опор и нагрузок, (включая уличные светильники).

12. Этапы работы с ПК

Практическая работа с ПК «GRID-IN» происходит в следующей последовательности:

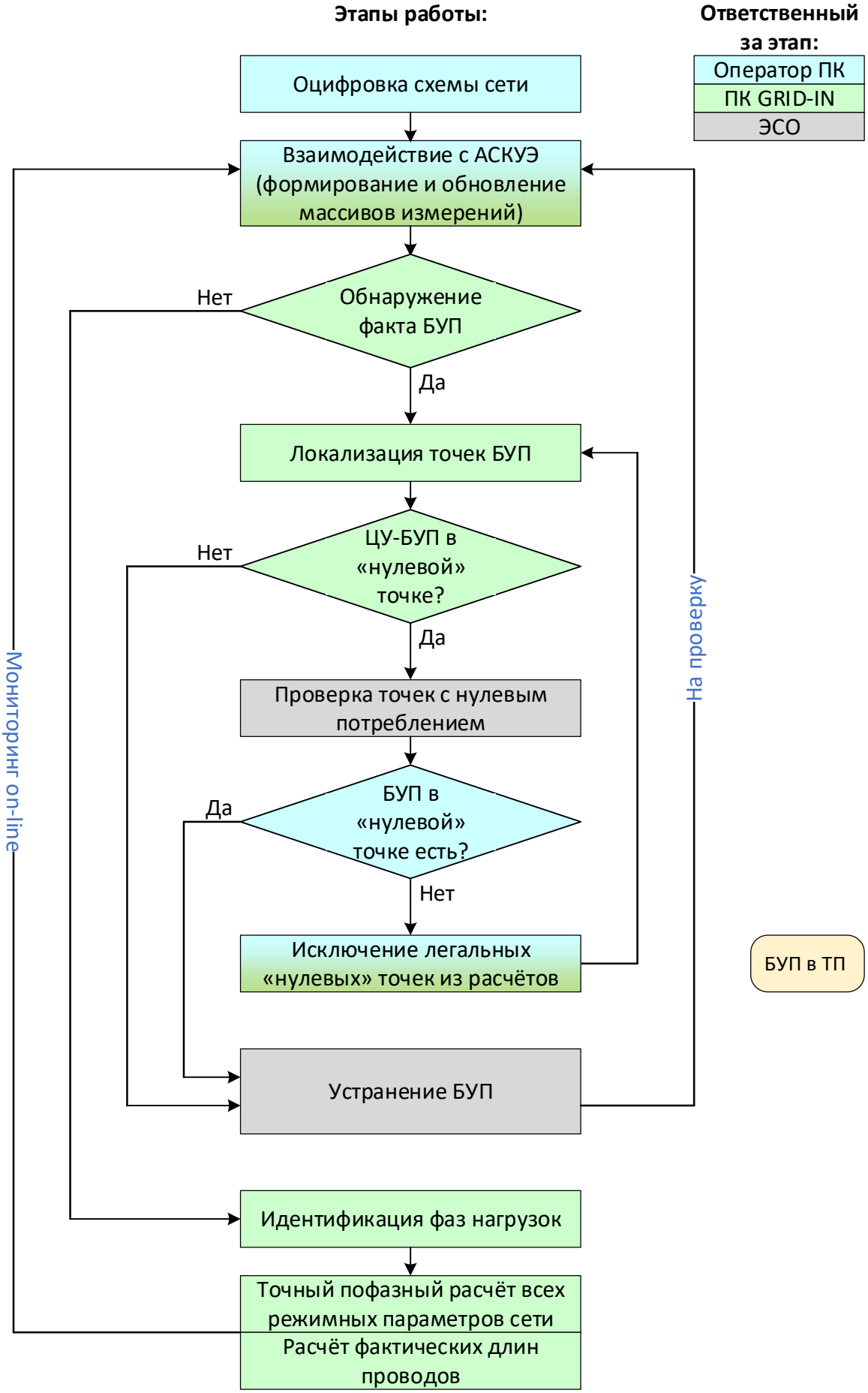
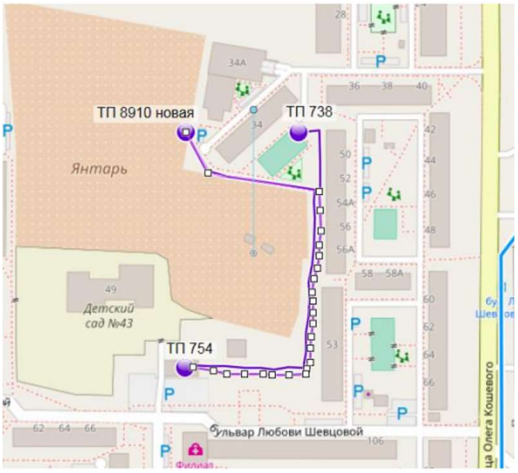


Рис.12: *Основные операции*

13. Аналоги разработки и соображения по интеграции ПК «GRID-IN» с ADMS диспетчерских центров

На сегодняшний день аналоги разработки не известны. В мире существует несколько систем класса ADMS, глубина мониторинга и анализа которых ограничена ступенью напряжения СН-2 (6-15 кВ). В этих сетях конечным потребителем является сама ТП-0,4 кВ, вместе со всей присоединённой к ней сетью НН.

Вот максимально-доступная детализация фрагмента схемы для этих систем (готовых рыночных продуктов):



Из этого фрагмента хорошо видно, что конечным элементом схемы является ТП-0,4 кВ, подключённая к сети по ЛЭП 6…15 кВ (ступень СН-2).
Сеть НН 0,4 кВ для анализа недоступна.
В то же время, основные потери ЭЭ (около 50%) приходятся именно на распределительные сети низкого напряжения, т.е. локализованы внутри ТП – конечном сетевом элементе схемы СН-2.
Можно поэтапно интегрировать готовые ЦБГ-НН в ADMS. Если кружок ТП начнет мигать или окрасится тревожным цветом, то наведя стрелку на эту проблемную ТП, оператор сможет раскрыть схему присоединенной к ней сети НН и получить полный её анализ.

Все действующие в сетях НН системы основаны на методиках неоперативного анализа, представленных на рис. 13:

Рис.13: *Методы расчёта потерь ЭЭ в сетях до 1 кВ*

Комплексы с указанным функционалом, позволяющие на базе АСКУЭ осуществлять оперативный мониторинг сетей НН, в настоящий момент не известны.

14. Ноу-хау

Не раскрываются следующие положения (объекты защиты авторского права):

п/п	«Ноу-хау»	Алгоритм
1)	Начальные приближения и шаг для искомых токов	Расчёт токов численными методами оптимизации
2)	Минимизируемая целевая функция	
3)	Температуро-независимая метрика целеуказания на точку с БУП	ЦУ-БУП
4)	Очерёдность перебора фаз счётчиков	Идентификация фаз
5)	Критерий останова перебора	
6)	Способ определения длин проводов	–

15. Текущее состояние и задачи разработки ПК «GRID-IN»

На синтетических данных работоспособность ПК «GRID-IN» полностью подтверждена. ПК был также апробирован на нескольких реальных сетях 0,4 кВ. При этом, типичной проблемой является достоверность реальных данных: как правило, после их получения, обнаруживается либо отсутствие ведомостей потребления абонентов, указанных на схеме, либо наоборот – некоторым профилям нагрузок невозможно

сопоставить соответствующие им точки на схеме. Для сети с корректными исходными данными было получено целеуказание на безучётный уличный светильник, отсутствовавший на схеме, что подтверждает работоспособность ПК.

Таким образом, главной текущей задачей является верификация ПК на реальных объектах – ТП-0,4 кВ со сформированными балансовыми группами. Требуется совместная работа с сетевой компанией по выбору пилотных фрагментов (формированию релевантной выборки для верификации ПК), сбору реальных исходных данных, их идентификации и физической инструментальной проверке ЦУ-БУП, формируемых комплексом.

Поскольку работы по внедрению систем на базе ИИ активно ведутся, с целью увеличения вероятности ЦУ-БУП представляется целесообразным дополнить алгоритмы-эксперты метрикой ПК:

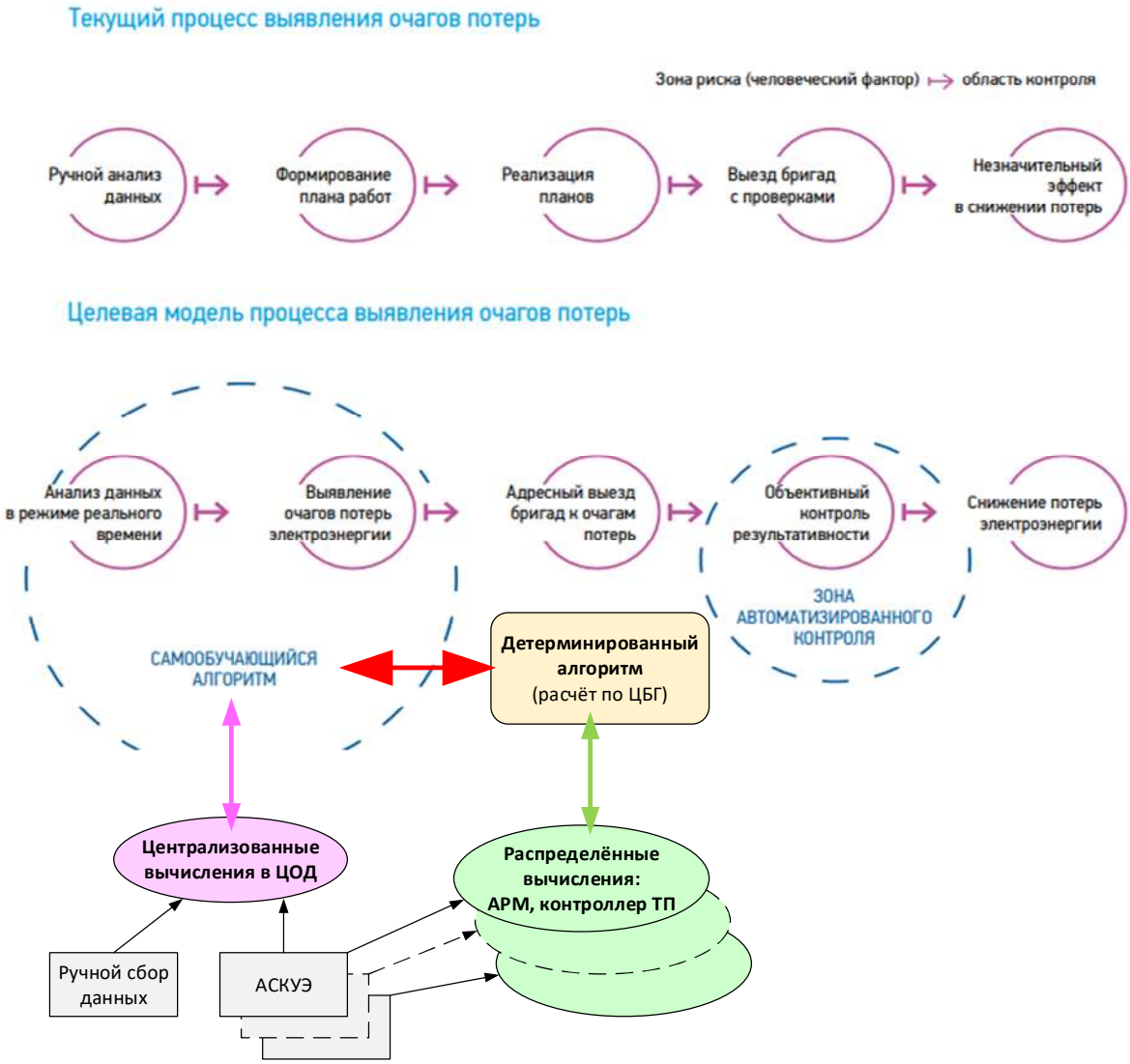


Рис.14: *Дополнение ИИ экспертными метриками ПК*

Обратная связь с разработчиками ПК «GRID-IN»

За дополнительной информацией и по всем вопросам, связанным с внедрением и применением ПК «GRID-IN», просьба обращаться:

Контактное лицо:	***Телефон:***	***E-mail:***
Алымов Иван Владимирович	*+7(903)771-02-02*	*ivanvalymov@yandex.ru*
Жданов Игорь Анатольевич	*+7(928)840-98-92*	*i_zh@rambler.ru*
Общий:	*–*	*mail@grid-in.com*