

УДК 621.3.05 (004.414.2)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕСТА УСТАНОВКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИММЕТРИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ С НАЛИЧИЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

**В.В. Романова¹, А.Г. Батухтин¹, С.В. Хромов¹, К.В. Суслов²,
М.В. Кобылкин¹**

¹Забайкальский государственный университет
Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, 30

²Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, Лермонтова, 83

E-mail: romanova181@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена развитию методического подхода коррекции уровня питающего напряжения в электрической сети путем разработки алгоритмизированного метода определения рационального места установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки. Разработанный метод позволяет реализовать процессы, направленные на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки в условиях некачественного питающего напряжения. Предложенный метод на основе программного обеспечения предусматривает проектные процедуры расчета различных вариантов симметрирования и выбор наиболее экономически целесообразного. Акцентировано внимание на основных критериях оценки принимаемых решений при проектировании местоположения технических средств симметрирования в электротехническом комплексе. Рассматриваются архитектура, основные функциональные особенности прикладной программы как инструмента реализации метода расчета. Программа обеспечивает выполнение электротехнических расчетов при проектировании, модернизации и эксплуатации электрических сетей. Предусматривает построение принципиальных схем участков электротехнических комплексов с установленными средствами симметрирования. Приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие эффективность разработанного метода при решении задач симметрирования напряжения в питающей электрической сети. Очевидно, что разработанный подход, основанный на автоматическом выборе мест размещения средств симметрирования в зависимости от условий эксплуата-

¹Романова Виктория Викторовна, старший преподаватель кафедры «Энергетика».

¹Батухтин Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, декан энергетического факультета.

¹Хромов Сергей Владимирович, старший преподаватель кафедры «Энергетика».

¹Кобылкин Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика».

²Сулов Константин Витальевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника».

Работа выполнена в рамках реализации научного гранта Совета по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» №349 – ГР от 03.02.2022.

ции электродвигательной нагрузки, позволяет автоматизировать проектные процедуры нормализации напряжения в электрической сети. Обеспечивает минимизацию несимметрии напряжений в питающей электрической сети, способствует повышению эксплуатационной надежности низковольтных асинхронных электродвигателей. Обсуждены полученные результаты исследования и перспективы применения разработанного подхода как для решения сложных задач проектирования, так и для экономического обоснования локальных проектных решений. Проведен детальный анализ, формализация результатов исследования с соответствующими выводами.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, несимметрия питающего напряжения, эксплуатационная надежность асинхронного электродвигателя, симметрирование напряжения в электрической сети, объектно-ориентированное программирование

Введение

Модернизация электротехнических комплексов (ЭТК) и систем электроснабжения различной конфигурации в рамках повышения их надежности и энергоэффективности является одним из приоритетных направлений электроэнергетической сферы. Разнообразные подходы при проектировании, модернизации и эксплуатации электрических сетей вызывают существенный интерес как у научно-инженерного сообщества, так и у широкого круга инвесторов, поскольку задачи, решаемые при реконструкции электроэнергетических объектов, напрямую связаны с конкурентоспособностью компаний [1].

На сегодняшний день существуют различные методы и подходы повышения эффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения, основными из которых являются [1–3] непосредственно направленные на обеспечение энергоэффективности и энергоемкости электросетевых кластеров электроэнергетических систем. Стоит отметить, что каждый из подходов [1–3] активно применяется как индивидуально, так и в комплексе, с обязательной интеграцией методов технико-экономического анализа.

Совершенно очевидно, что качественная модернизация действующих систем электроснабжения и объектов даже в рамках одного из методов является сложной многомерной задачей, которая предполагает учет и обработку большого количества исходной информации. При этом существенный вклад в увеличение ее количества вносит автоматизация энергетической инфраструктуры. Мониторинг, учет, контроль большого объема информации, постоянно изменяющаяся динамика отслеживаемых величин повлекли за собой повсеместное применение современных средств компьютерных технологий, что, в свою очередь, привело к необходимости разработки новых методов и подходов модернизации объектов электроэнергетической сферы [4].

Стоит подчеркнуть, что рассмотренные методы и подходы недостаточно раскрывают вопрос решения проблемы обеспечения эффективного функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки в условиях некачественного напряжения в питающих электрических сетях. Актуальность данного аспекта подтверждают исследования [5–7], аргументирующие значительное негативное влияние искажения уровня питающего напряжения на эффективность работы низковольтных асинхронных электродвигателей.

Как известно [8, 9], в ряде регионов России и за рубежом наблюдается низкий уровень качества электрической энергии (КЭЭ), преобладают отклонения от

нормативных значений ГОСТ 32144–2013 [10] таких показателей качества электрической энергии (ПКЭ), как несимметрия и несинусоидальность напряжения, отклонение напряжения. Так, в электрических сетях Забайкальской электроэнергетической системы зафиксированы значительные отклонения от установленных норм следующих показателей: K_{2U} , $K_{U(3)}$, $K_{U(9)}$, $K_{U(15)}$, $\delta U_{(+)}$, $\delta U_{(-)}$ [9], превышающие в 2–3 раза нормируемое ГОСТ 32144–2013 [10] значение.

Именно поэтому в рамках настоящей статьи предлагается рассмотреть развитие методического подхода коррекции уровня питающего напряжения в электрической сети путем разработки алгоритмизированного метода определения рационального места установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки в условиях несимметрии питающего напряжения.

Разработка технических и проектных решений состоит из научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. При этом неотъемлемой частью процесса проектирования является применение программных средств, которые позволяют решить большой спектр задач различной степени сложности, что, в свою очередь, позволяет упростить процесс работы инженерно-технического состава предприятий, а помимо того сократить сроки выполнения проекта.

Как известно, при выполнении электротехнических расчетов при проектировании, модернизации и эксплуатации электрических сетей применяют специализированные программные комплексы (ПК), системы автоматизированного проектирования (САПР). Использование программного обеспечения позволяет эффективно совмещать графическое отображение электрической схемы и возможности расчетов. ПК, САПР функционального проектирования относят к числу сложных систем, состоящих из большого числа составных элементов и решаемых задач. При этом наибольшая эффективность от внедрения САПР, ПК достигается при автоматизации всего процесса проектирования, начиная от постановки задачи и заканчивая выпуском рабочей проектной документации [11].

Критериями выбора программного решения при расчете ЭТК являются требования, предъявляемые к функциональным возможностям ПК, САПР. При расчете ЭТК, содержащих электродвигательную нагрузку в условиях наличия несимметрии питающего напряжения, сформулированы требования к программам, направленным на проектирование и анализ электрической сети:

- графическое отображение электрической сети в наиболее удобной и наглядной форме представления;
- проектирование ЭТК или участка сети разной конфигурации посредством ввода параметров, характеризующих элементы электрической сети;
- анализ качества электрической энергии в ЭТК (участке ЭТК) по показателю качества электрической энергии – коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U});
- расчет дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети 0,4 кВ, обусловленных несимметрией напряжений, при симметричном (несимметричном) режиме работы сети;
- проведение расчетов технико-экономического анализа с целью оценки рационального места размещения технических средств симметрирования в ЭТК;
- графическое изображение схем вариантов расчета с конкретным указанием местоположения средств симметрирования в ЭТК.

Обзор существующих программных решений. Широко применяемые на

практике программные комплексы, системы автоматизированного проектирования обладают рядом особенностей, каждое программное решение имеет индивидуальные функциональные возможности, ограничения в использовании, немаловажным фактором являются стоимостные показатели программных продуктов.

Программное обеспечение (ПО) для электротехнических расчетов, анализа режимов работы распределительных сетей разделим на две категории:

- коммерческое ПО;
- учебное или исследовательское ПО.

Коммерческие ПО разработаны по принципу «все в одном», обладают высокой вычислительной эффективностью, простотой применения, полнотой моделей, методов расчета и анализа электрических сетей. Основные недостатки коммерческих ПО – их высокая стоимость, закрытый доступ к исходному коду программ; кроме того, скрыты особенности алгоритмов и моделей, применяемых при расчетах [12].

Исследовательские ПО разработаны для решения точечных задач, имеют функциональные особенности, связанные со спецификой использования.

Для выбора оптимальной прикладной программы, соответствующей сформулированным требованиям, проведен анализ функциональных возможностей таких программных продуктов, как MATLAB/Simulink [13], PSCAD [14], «EnergyCS Потери» [15], FreeMath [16], ATM-EMTP [17], EnergyCS [18], E3.series [19], ElectricA [20], РТП 3 [21], Flow 3 [22], «Fazonord-качество» [23], «Несимметрия» [24].

В результате анализа рассмотренных программных продуктов сформулируем следующее: ПО, решающие точечные задачи, частично соответствуют заданным требованиям, сосредоточены на отдельных аспектах исследования; применяются для расчета ПКЭ и дополнительных потерь мощности, моделирования режимов работы сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством, расчета несимметричных режимов работы электрической сети 0,4 кВ, проектирования участка сети и расчета дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией напряжений и токов в сетях 0,4 кВ. Так, например, ПК ElectricA предназначен для автоматизации выполнения работ на этапах проектирования и эксплуатации электрических сетей, позволяет производить электротехнические расчеты и анализ режимов работы распределительных сетей. ПК «Несимметрия» разработан в ФГБОУ ВО ИрГАУ им. А.А. Ежевского под руководством И.В. Наумова, успешно применим при расчете несимметричных режимов работы электрической сети, показателей несимметрии токов и напряжений, а также дополнительных потерь мощности. ПК «Fazonord-качество» разработан в ФГБОУ ВО ИрГУПС В.П. Закарюкиным, А.В. Крюковым, позволяет выполнять моделирование и расчет несимметричных режимов работы электрической сети 0,4 кВ.

Коммерческое ПО MATLAB/Simulink обладает большим потенциалом моделирования и расчета электрических сетей, но несмотря на большое количество преимуществ не обладает возможностью дополнения, обновления исходной информации посредством ввода параметров (например, средств симметрирования, их типа, мощности, стоимости) при моделировании режимов работы сети 0,4 кВ с симметрирующим устройством; требует значительных системных требований к ЭВМ.

В силу описанных факторов необходимо отметить, что требуется разработка программного обеспечения, направленного на проектирование и анализ электри-

ческой сети, содержащей электродвигательную нагрузку в условиях некачественного питающего напряжения.

Материалы и методы исследования

Обоснование технических решений по выбору типа, места размещения средств симметрирования (СС) в зависимости от условий эксплуатации электродвигательной нагрузки основано на применении программного обеспечения проектирования ЭТК с АД.

Разработка и реализация программы выполняются в соответствии с этапами жизненного цикла программного обеспечения. Для разработки программы определено назначение и спецификация (функциональные возможности) системы, проведен анализ данных (структурирование данных, ограничение данных), разработан алгоритм обработки данных, разработаны интерфейсные решения системы.

Программный алгоритм основан на методике расчета ЭТК с учетом использования средств симметрирования и мест их установки. Обобщенная блок-схема алгоритма расчета приведена на рис. 1. Подробный алгоритм расчета приведен в [25].

Программа реализована при помощи языка программирования C# в среде программирования Microsoft Visual Studio 2012 с использованием встраиваемой кроссплатформенной базы данных SQLite [26].

Основные функциональные возможности программы:

- ввод, редактирование исходных и справочных данных элементов ЭТК;
- ввод дополнительных данных для расчета вариантов установки СС;
- построение схемы ЭТК (участка ЭТК);
- многовариантный расчет установки СС в ЭТК;
- технико-экономический расчет установки СС в ЭТК;
- графическое изображение схем вариантов расчета с конкретным указанием местоположения СС в ЭТК.

Задачи, решаемые программой:

- накопление и хранение справочных и исходных данных о схеме ЭТК (участке ЭТК);
- проектирование схемы ЭТК (участка ЭТК) посредством ввода исходных данных;
- проведение расчета оптимального места установки средств симметрирования в ЭТК;
- проектирование схемы ЭТК (участка ЭТК) с установленными средствами симметрирования по результатам расчета;
- вывод информации технико-экономического характера по результатам расчета.

Интерфейсные решения программы. Интерфейсные решения имеют большую значимость для разработки программ, так как взаимодействие пользователя с программой происходит через визуальные формы интерфейса.

Одним из вариантов представления интерфейсных решений является интерфейс, заданный в виде табличных форм объектов системы. В данном интерфейсном решении акцентировано внимание на описание элементов и ЭТК в целом с помощью численных значений, благодаря чему интерфейс программы не требует дополнительных пояснений, понятен и прост в использовании.

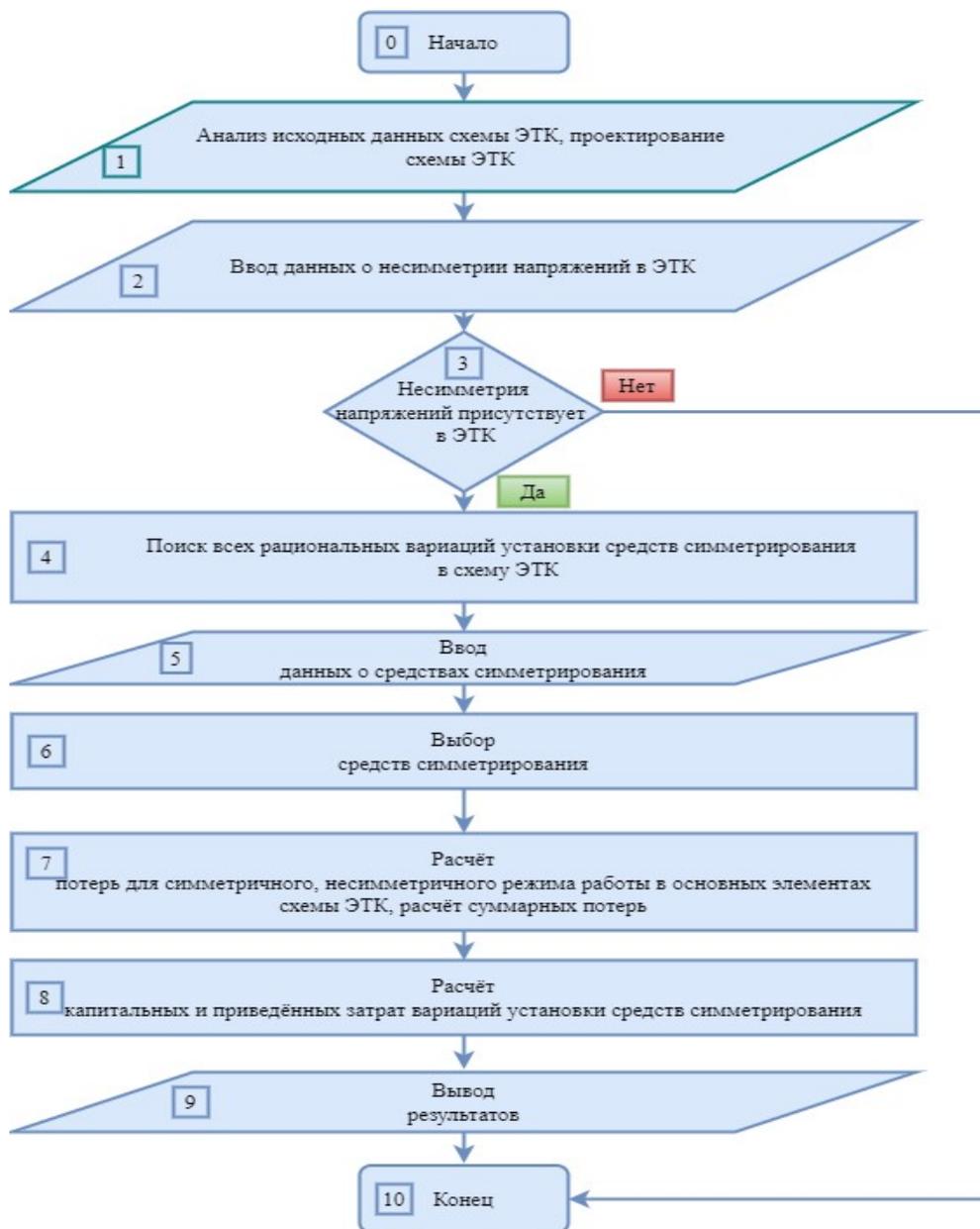


Рис. 1. Архитектура построения алгоритма расчета ЭТК с учетом средств симметрирования и мест их установки

В другом варианте интерфейсных решений представление объектов ЭТК и построение схем различных конфигураций ЭТК (участка сети) может быть выполнено графически. Первым действием в данном варианте описываются общие исходные данные, после чего проектируется схема ЭТК с помощью графических обозначений элементов схемы. При добавлении элемента в схему необходимо ввести его исходные параметры. После проектирования ЭТК (участка ЭТК) проводится расчет рационального места установки СС и вывод, для наглядного представления, спроектированной схемы с установленными СС. В таком интерфейсном решении более удобна визуализация схемы ЭТК, но осложняется ввод

исходных данных, так как в таблице представить исходные данные проще и удобнее.

Таким образом, оптимальным интерфейсным решением разрабатываемой программы является представление исходных объектов в табличном формате; представление выходных объектов и данных, полученных в результате обработки алгоритма, в графическом виде.

Разработка структуры базы данных. Разработка структуры базы данных (БД) является одним из основных процессов реализации прикладной программы. Распространенным типом организации БД являются реляционные базы данных, состоящие из множества взаимосвязанных таблиц, причем каждая таблица содержит информацию об объектах различного типа.

Разработка эффективной БД состоит из нескольких этапов: анализ требований; создание логической структуры; преобразование логической структуры БД в физическую структуру выбранной для реализации БД системы управления базами данных (СУБД).

Для разработки программы проведен анализ данных по назначению, разработана структура БД, выявлены ограничения численных данных по принимаемым значениям. Данные, определяемые назначением в системе, могут быть входными (исходными), дополнительными и выходными.

Исходные данные в системе логически разделены на две группы: справочные данные и общие данные, характеризующие схему ЭТК или участок сети. Справочные данные – это паспортные данные или нормируемые данные основных элементов схемы ЭТК, используемые в алгоритме расчета рационального места установки СС. Справочные данные формируются в справочники для элементов схем ЭТК. Общие данные характеризуют схему ЭТК или участок сети, являются неоднородными и разбиваются на общую информацию об участке системы и информацию, характеризующую каждый элемент схемы ЭТК или участка сети.

Для проектирования разных конфигураций схем ЭТК необходима информация об элементах схемы ЭТК, их взаимосвязи друг с другом посредством линий и соединительных узлов. Такая информация является дополнительной в системе. Промежуточные данные, полученные при расчете рационального места установки СС и используемые для проектирования конфигураций схем ЭТК, относятся к дополнительным данным. Выходным данным соответствует информация технико-экономического характера, полученная по результатам расчета.

Разработанная БД содержит таблицы таких направлений: справочники элементов ЭТК, таблицы исходных данных ЭТК, таблицы выходных данных ЭТК, дополнительные таблицы, необходимые для построения конфигураций схем ЭТК и для промежуточных данных.

Важнейшим звеном разработанной БД является таблица БД СС. БД средств симметрирования – обновляемая, пользователь имеет возможность дополнения, изменения и удаления параметров (типа, мощности, стоимости) средств симметрирования, необходимых для выполнения проекта. БД средств симметрирования содержит следующие устройства:

– симметрирующие трансформаторы ТСТ2 (ТСТ2–10, ТСТ2–16, ТСТ2–25, ТСТ2–40, ТСТ2–63, ТСТ2–100, ТСТ2–160, ТСТ2–200, ТСТ2–250, ТСТ2–300, ТСТ2–400, ТСТ2–630, ТСТ2–1000) [27];

- нормализаторы NORMEL серии ESSV-I (NORMEL ESSV-I 3.200-050-02, NORMEL ESSV-I 3.200-080-02, NORMEL ESSV-I 3.200-130-02, NORMEL ESSV-I 3.200-160-02, NORMEL ESSV-I 3.200-205-02 и др.) [28];
- трансформаторы серии ТМГСУ (ТМГСУ–25/10, ТМГСУ–40/10, ТМГСУ–63/10, ТМГСУ11–100/10, ТМГСУ11–160/10, ТМГСУ11–250/10) [29];
- вольтодобавочные трансформаторы типа ТВМГ (ТВМГ–26/70, ТВМГ–52/125, ТВМГ–66/160, ТВМГ–105/250) [30].

Таким образом, при выполнении расчетов пользователь выбирает из БД СС, необходимые по функциональным возможностям, мощности и стоимости устройства симметрирования (СУ).

Назначение и применение разработанной программы. Программа выполняет построение принципиальных схем участков ЭТК с установленными СУ, осуществляет расстановку средств симметрирования в ЭТК при топологии сети любой сложности.

Программа реализует необходимые расчеты на основе задаваемых исходных данных об участке ЭТК с электродвигательной нагрузкой. Важнейшей особенностью программы является возможность построения пользователем расчетной схемы системы электроснабжения, позволяющей по заданной конфигурации выполнять многовариантные электротехнические расчеты ЭТК с установленными средствами симметрирования.

Специфика программы состоит в том, что на основе полученных в результате исследований допустимых значений $K_{2U_{дон}}$ для АД [33], занесенных в программный алгоритм, данных экспериментальных исследований K_{2U} исследуемой электрической сети определяется размещение средств симметрирования в ЭТК. Изменяя параметры расчетной схемы (заменяя средства симметрирования, их количество), можно подобрать их таким образом, чтобы во всем ЭТК обеспечивалась надежная работа АД. При этом мощность и количество средств симметрирования подбираются с учетом особенностей конкретной сети.

Тенденция внедрения средств симметрирования в ЭТК главным образом направлена на сокращение дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети, увеличение срока службы электрооборудования, повышение качества электрической энергии, а кроме того, на снижение ущерба от аварийных ситуаций, вызванных выходом из строя электрооборудования.

Реализация программного обеспечения, выполняющая проектные процедуры подбора средств симметрирования, предоставляет следующие возможности:

- ввода исходных данных схемы ЭТК, сохраняемых в локальной базе данных;
- расчета оптимального места установки СС в ЭТК;
- определения технико-экономических показателей расчета схемы ЭТК;
- графического отображения конфигураций исходной схемы ЭТК (участка ЭТК) и схемы ЭТК с установленными СС;
- сервиса для редактирования справочных данных схемы ЭТК.

Программа определения наиболее рационального места установки технических средств симметрирования в ЭТК может быть применена при разработке проектов электросетевых кластеров с наличием электродвигательной нагрузки.

Критерии оценки принимаемых решений при проектировании местоположения технических средств симметрирования. Оценить наиболее предпочтительные технические средства симметрирования и места их установки в электротехническом комплексе предлагается на основании сопоставления значений при-

веденных затрат различных вариаций на реализацию мероприятий с целью выявления их минимального значения.

Метод поиска минимума приведенных затрат относится к статистическим методам оценки инвестиционных проектов и не учитывает фактор времени. Метод получил широкое распространение в задачах технико-экономического сопоставления вариантов проектов в энергетике в условиях плановой директивной экономики времен СССР [3]. В настоящее время благодаря своей простоте метод закрепился (как в исходном виде, так и с различными модификациями) в задачах оптимизации различных энергетических систем и объектов, позволяя существенно сокращать вычислительную нагрузку при сравнительно адекватном результате экономической оценки эффективности инвестиций.

В концепции определения рационального места установки технических СС в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки использование метода минимума приведенных затрат также оправдано.

Приведенные затраты ($ПЗ$) в предложенном методе рассчитываются по стандартной формуле [3] как сумма текущих издержек (I_i) и капитальных затрат ($KЗ$), приведенных к текущему году путем умножения на нормативный коэффициент (E_n):

$$ПЗ = E_n \cdot \sum_{j=1}^m KЗ_j + \sum_{i=1}^n I_i. \quad (1)$$

Текущие издержки оцениваются через изменение затрат на эксплуатацию ЭТК до и после внедрения средств симметрирования.

Капитальные затраты оцениваются по стоимости планируемых к установке средств симметрирования и стоимости пусковой, защитной и регулирующей аппаратуры. Кроме того, капитальные затраты учитывают монтажные, наладочные работы и доставку СС от производителя к месту установки.

Нормативный коэффициент является основным критерием метода минимума приведенных затрат. Коэффициент E_n зависит от планируемого срока окупаемости; в свою очередь, планируемый срок окупаемости различен для разных отраслей, кроме того, не существует определенного значения, устанавливающего, каким он должен быть [3]. В энергетической отрасли нормативный коэффициент традиционно принимается $E_n = 0,15$ о.е. для проектов, связанных с модернизацией существующих энергетических систем и объектов, что эквивалентно $\approx 6,7$ годам планируемого срока окупаемости.

С целью оценки эффективности принимаемых решений при проектировании местоположения технических средств симметрирования в ЭТК рассмотрим шесть вариантов размещения устройств симметрирования с различными вариациями мест их установки. Капиталовложением для каждого варианта инвестиционного проекта являются: стоимость средств симметрирования, их доставка, монтаж и наладка, периферийные устройства. В данном случае это первоначальные затраты; другие факторы, например затраты на ежегодные текущие эксплуатационные издержки, амортизационные отчисления, считаем равноценными.

Для разрабатываемого методического подхода произведена валидация выбранного метода оценки эффективности технических решений при проектировании размещения устройств симметрирования в ЭТК, сопоставление результатов расчетов по методу минимума приведенных затрат с результатами стандартного динамического метода оценки инвестиционных проектов [31, 32].

Использованы стоимостные значения технических средств симметрирования, взятые от компании «Энергосберегающие технологии», г. Санкт-Петербург [27], ООО НПК «АВЭК», г. Новосибирск [28].

На рис. 2 наглядно продемонстрирован пример сравнения результатов экономической оценки эффективности мероприятий по методу минимума приведенных затрат с результатами сравнения по дисконтированному сроку окупаемости (DPP) для 6 вариантов установки технических средств симметрирования.

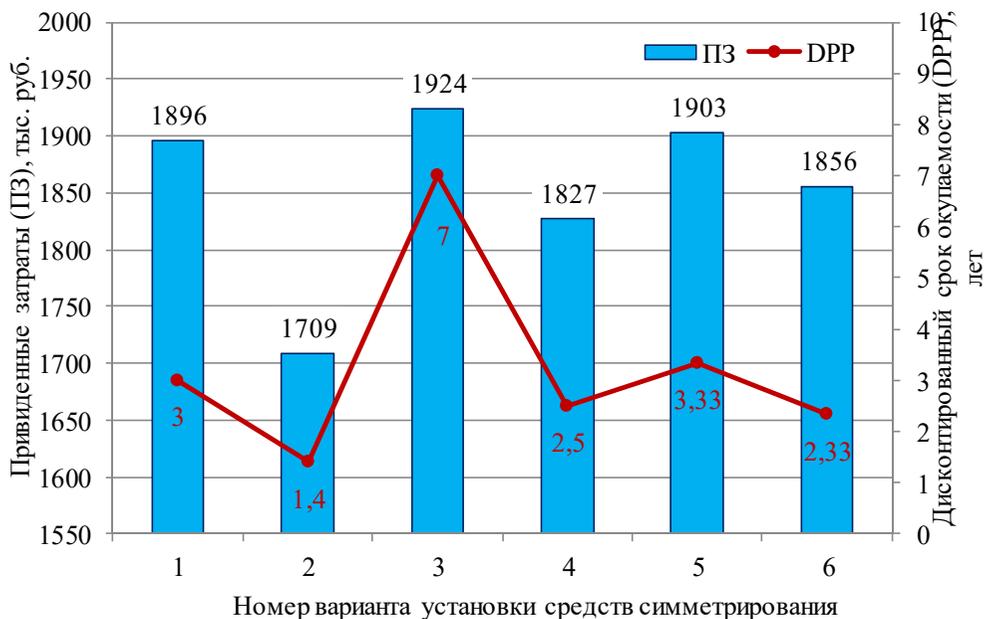


Рис. 2. Сравнение результатов экономической оценки эффективности мероприятий по методам минимума приведенных затрат и дисконтированного срока окупаемости

Анализируя представленные на рис. 2 результаты исследования, отметим, что наиболее экономически эффективным вариантом размещения средств симметрирования в ЭТК является вариант 2 как по критерию метода минимума приведенных затрат, так и по критерию метода дисконтированного срока окупаемости.

Результаты исследования и их обсуждение

Апробация метода в действующей электрической сети 0,4 кВ Забайкальского края.

Апробация программы проведена на примере участка электрической сети с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. Использовались следующие исходные данные [25]:

- 1) экспериментальные значения несимметрии напряжений в узлах сети 0,4 кВ с. Таптугары;
- 2) топология участка электрической сети, сведения об электропотребителях;
- 3) значения допустимых значений ($K_{2U_{don}}$) низковольтных асинхронных электродвигателей.

Основным критерием при разработке мероприятий, ориентированных на снижение несимметрии в электрической сети, обеспечение эффективного функционирования ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки, является допустимое значение $K_{2U_{don}}$ электродвигателей [33]. Программа автоматически опреде-

ляет $K_{2U_{\text{дон}}}$ электродвигателей, находящихся в исследуемом ЭТК, выявляя тем самым необходимые значения порога симметрирования. Стоит отметить, что допустимое значение $K_{2U_{\text{дон}}}$ низковольтных асинхронных электродвигателей индивидуально для каждого типоразмера АД. Согласно проведенным исследованиям [33], безаварийная эксплуатация АД при длительном режиме работы возможна при $K_{2U_{\text{дон}}}$ не более 1,3 %.

При рассмотрении возможных вариаций установки СС исследуемой схемы участка электрической сети с. Таптугары возможно предусмотреть две вариации мест установки устройств симметрирования: перед центральным узлом; на каждую линию с электродвигательной нагрузкой. Кроме того, существуют три варианта компоновки СС для каждой вариации места установки.

Исходя из результатов исследования значений $K_{2U_{\text{дон}}}$ электродвигателей, экспериментальных данных коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) в электрической сети 0,4 кВ, сведений о величинах потерь мощности в элементах исследуемой электрической сети, выполняется автоматический выбор мест размещения СС в ЭТК. В ходе тестирования программы получены следующие данные (рис. 3).

В результате реализации программы выявлено экономически целесообразное расположение средств симметрирования в ЭТК исходя из показателя «Приведенные затраты». На основе полученных результатов программы (см. рис. 3) сформулируем следующий вывод: наилучший экономический эффект достигается использованием симметрирующих трансформаторов марки ТСТ2 мощностью 25 кВт по варианту 2 на каждую линию с АД.

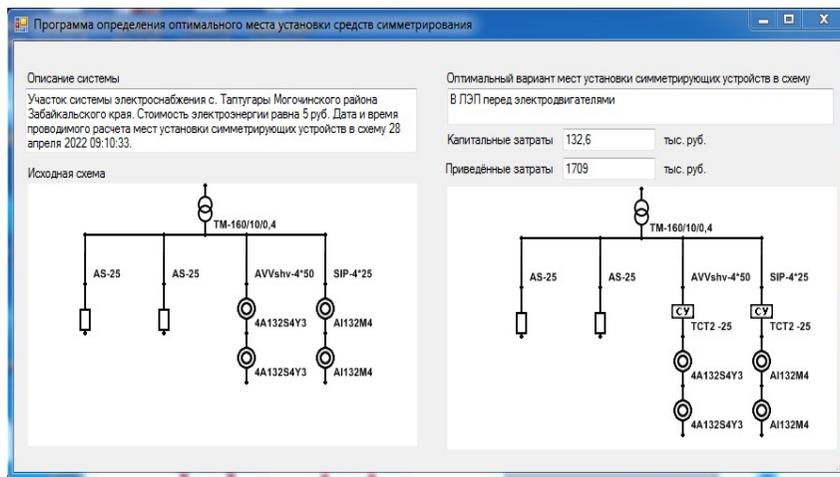


Рис. 3. Вывод результатов расчета программы

Таким образом, обеспечение надежного электроснабжения потребителей с наличием электродвигательной нагрузки в рассмотренной схеме реализовано применением СС индивидуально на каждую линию с АД, что позволило решить комплекс задач безопасного и стабильного функционирования электротехнического комплекса в условиях некачественного напряжения в питающей электрической сети.

Разработанный методический подход демонстрирует эффективность мероприятий при решении вопросов симметрирования напряжения в электрической сети. При использовании симметрирующих трансформаторов марки ТСТ2 в схе-

ме участка электрической сети с. Таптугары устранено искажение величины несимметрии питающего напряжения. Симметрирующие трансформаторы показали достаточную стабильность коррекции напряжения. Так, согласно экспериментальным исследованиям, проведенным после внедрения СС, максимальная величина K_{2U} изменилась от 4,6 до 1,27 %, тем самым увеличив на 30 % срок службы электрооборудования, работающего в данной электрической сети, и снизив количество капитальных ремонтов АД вдвое. При этом значения приведенных затрат в выбранном варианте размещения средств симметрирования составили $ПЗ = 1709$ тыс. руб.

Резюмируя вышеизложенное, отметим следующее: прикладная программа как инструмент разработанного метода позволяет выполнить автоматический расчет места размещения и выбор средств симметрирования в ЭТК предприятий. Кроме того, она наглядно демонстрирует места установки СС в проектируемой схеме ЭТК и отображает технико-экономическую информацию комплекса технических мероприятий, ориентированных на обеспечение эффективного функционирования ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки, путем нормализации уровня несимметрии питающего напряжения.

Заключение

1. Представлено концептуальное видение разработки методического подхода коррекции уровня питающего напряжения в электрической сети путем реализации алгоритмизированного метода определения рационального места установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки в условиях некачественного напряжения в питающей электрической сети.

2. Предложенный метод определения рационального места установки технических средств симметрирования в ЭТК, основанный на автоматическом выборе мест размещения средств симметрирования в зависимости от условий эксплуатации электродвигательной нагрузки, позволяет автоматизировать проектные процедуры нормализации напряжения в электротехническом комплексе. Основопологающим моментом метода является показатель – допустимое значение $K_{2U_{дон}}$ электродвигателей, данное условие заложено в алгоритм прикладной программы. Указанный показатель определяет, главным образом, допустимый эксплуатационный режим работы низковольтных асинхронных электродвигателей.

3. Разработанный подход представляет интерес при разработке проектов электроэнергетических объектов в случае преобладания низкого качества питающего напряжения, в частности несимметричных режимов работы электрической сети. Применим при модернизации кластеров электрических сетей промышленных предприятий, имеющих в своем составе асинхронный электропривод. Позволяет упростить процесс работы инженерно-технического состава предприятий, сократить сроки выполнения проекта. Методический подход достаточно понятен и прост в использовании, не требует высокой квалификации персонала, специальных знаний проектирования объектов электроэнергетической сферы.

4. Применение метода минимума приведенных затрат в качестве критерия оценки принимаемых решений при проектировании местоположения технических средств симметрирования оправдано для данной локальной технико-экономической задачи, поскольку позволяет сократить необходимый объем исходных данных без потери качества оценки. Результаты оценки вариантов про-

ектных решений, полученные при рассмотрении методом минимума приведенных затрат, коррелируют с результатами стандартного динамического метода оценки инвестиционных проектов.

5. Предложенный метод на основе программного обеспечения подтвердил свою работоспособность на реальном объекте в действующей электрической сети 0,4 кВ Забайкальского края. Отмечена эффективность внедрения технических средств симметрирования. Так, максимальная величина K_{2U} изменилась от 4,6 до 1,27 %, тем самым увеличив на 30 % срок службы электрооборудования, работающего в данной электрической сети, и снизив количество капитальных ремонтов АД вдвое. Следовательно, стоит заметить, что повышение энергоэффективности электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки обеспечивается путем улучшения качества электрической энергии, а именно минимизации уровня несимметрии напряжений в питающей электрической сети и, как следствие, снижения дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети, увеличения срока службы асинхронных электродвигателей, уменьшения количества планово-предупредительных ремонтов АД, устранения ущербов от аварийных ситуаций, вызванных выходом из строя АД.

6. Разработанный методический подход показал полноту и достаточность решений, внедряемых в проектную и эксплуатационную практику, обеспечивающих эксплуатационную надежность АД, повышающих эффективность работы электротехнического комплекса в целом.

7. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методологической концепции решения задач, направленных на обеспечение эффективного и надежного функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки посредством коррекции уровня несимметрии питающего напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харлампьева С.С., Горелов С.В., Сахнова Н.Н., Булыгина А.В., Масунов И.Г. Анализ методов повышения энергоэффективности систем энергоснабжения // Актуальные вопросы энергетики. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Омск, 2021. С. 14–18.
2. Степанов В.М., Косырихин В.С. Методика расчета и основы проектирования систем электроснабжения объектов на ПЭВМ // Известия ТулГУ. Технические науки, 2015. Вып. 12. Ч. 2. С. 54–66.
3. Кангро М.В. Методы оценки инвестиционных проектов: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 131 с.
4. Воротницкий В.Э., Моржин Ю.И. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития / под ред. Н.Д. Рогалева. М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 97–113.
5. Palácios R.S., da Silva I.N., Godoy W.F., et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults // Soft Computing. 2020. Vol. 24. Pp. 16935–16946.
6. Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надежность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: Изд-во КГЭУ, 2021. Т. 23. № 3. С. 80–89.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В., Швецова И.А. Надежность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Маріуполь: Изд-во ПДТУ. 2005. Вып. 15. Ч. 2. С. 25–29.
8. Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2017. 219 с.

9. *Oleg V. Zapanov, Lidiia I. Kovernikova.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ. 2014. 19 с.
11. *Dibowski H., Ploennigs J. and Kabitzsch K.* Automated Design of Building Automation Systems // In IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. Pp. 3606–3613.
12. *Raghunathan S., Prasad A., Mishra B.K. and Hsihui Chang.* Open source versus closed source: software quality in monopoly and competitive markets // In IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 2005. Vol. 35. Pp. 903–918.
13. MATLAB/Simulink [Электронный ресурс]. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (Дата обращения 06.08.2022).
14. PSCAD [Электронный ресурс]. <https://www.pscad.com/> (Дата обращения 06.08.2022).
15. EnergyCS Потери [Электронный ресурс]. <https://www.energycs.ru/programs/energycs-loss/> (Дата обращения 06.08.2022).
16. FreeMath [Электронный ресурс]. <http://freemat.sourceforge.net/> (Дата обращения 06.08.2022).
17. ATM-EMTP [Электронный ресурс]. <https://www.eeug.org/> (Дата обращения 06.08.2022).
18. EnergyCS [Электронный ресурс]. <https://www.energycs.ru/> (Дата обращения 06.08.2022).
19. E3.series [Электронный ресурс]. <https://e3series.ru/> (Дата обращения 06.08.2022).
20. ElectricCA [Электронный ресурс]. <https://electrics-soft.ru/> (Дата обращения 06.08.2022).
21. РТП 3 [Электронный ресурс]. <http://www.rtp3.ru/> (Дата обращения 06.08.2022).
22. Flow 3 [Электронный ресурс]. <https://www.flow3d.com/> (Дата обращения 06.08.2022).
23. Fazonord-качество [Электронный ресурс]. <https://ntcees.ru/tender/Fazonord.pdf> (Дата обращения 06.08.2022).
24. Несимметрия [Электронный ресурс]. http://niieng.ru/production-obsego-primenenia/software/rtkz_2 (Дата обращения 06.08.2022).
25. *Romanova Victoria.* Determination of optimal location for installation of symmetry facilities in 0.4 kV power supply systems with motor-drive load // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 58. 03014. 9 p.
26. Неполное руководство по SQLite для пользователей Windows [Электронный ресурс]. <http://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/10100/1/> (Дата обращения 27.07.2022).
27. Симметрирующие трансформаторы [Электронный ресурс]. <https://et-spb.ru/transformatory-simmetrirujushhie/tst2/> (Дата обращения 06.08.2022).
28. Нормализаторы качества Normel [Электронный ресурс]. <https://normel.ru/> (Дата обращения 08.08.2022).
29. Трансформаторы марки ТМГСУ [Электронный ресурс]. <http://www.mitek.spb.ru/catalog/id12/> (Дата обращения 08.08.2022).
30. Вольтодобавочные трансформаторы типа ТВМГ [Электронный ресурс]. https://www.tehenergoholding.ru/index.php?menu_id=84&menu_parent_id=83 (Дата обращения 08.08.2022).
31. *Milano M., Van Hove W.* Reduced cost-based ranking for generating promising subproblems // Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 2470. p.16.
32. *Mollah M.A.S., Rouf M.A., Rana S.M.S.* A study on capital budgeting practices of some selected companies in Bangladesh // PSU Research Review. 2021. Vol. 5. p.13.
33. *Романова В.В., Хромов С.В.* Эксплуатационная надежность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент: Изд-во ТашГТУ, 2019. № 4. С. 136–148.

Статья поступила в редакцию 07 июля 2022 г.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE RATIONAL INSTALLATION LOCATION OF TECHNICAL MEANS OF SYMMETRY IN AN ELECTRICAL COMPLEX WITH THE PRESENCE OF AN ELECTRIC MOTOR LOAD

*V.V. Romanova*¹, *A.G. Batukhtin*¹, *S.V. Khromov*¹, *K.V. Suslov*²,
*M.V. Kobylkin*¹

¹ Trans-Baikal State University

30, Alexandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

E-mail: romanova181@mail.ru

Abstract. *The work is devoted to the development of a methodological approach to correcting the level of supply voltage in the electrical network by developing an algorithmized method for determining the rational installation location of technical means of symmetry in an electrical complex with the presence of an electric motor load. The developed method makes it possible to implement processes aimed at ensuring the effective functioning of the electrical complex with the presence of an electric motor load in conditions of low-quality supply voltage. The proposed method, based on software, provides design procedures for calculating various options for symmetry and choosing the most economically feasible. Attention is focused on the main criteria for evaluating decisions made when designing the location of technical means of symmetry in the electrical complex. The architecture, the main functional features of the application program as a tool for implementing the calculation method are considered. The program ensures the implementation of electrical calculations in the design, modernization and operation of electrical networks. It provides for the construction of schematic diagrams of sections of electrical complexes with installed means of symmetry. The results of experimental studies demonstrating the effectiveness of the developed method in solving problems of voltage symmetry in the supply electrical network are presented. It is obvious that the developed approach, based on the automatic selection of the locations of the means of symmetry depending on the operating conditions of the electric motor load, makes it possible to automate the design procedures for voltage normalization in the electrical network. Provides minimization of voltage asymmetry in the supply electrical network, contributes to improving the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. The obtained research results and prospects for the application of the developed approach are discussed, both for solving complex design problems and for the economic justification of local design solutions. A detailed analysis and formalization of the results of the study with relevant conclusions were carried out.*

Keywords: *asynchronous electric motor, asymmetry of the supply voltage, operational reliability of an asynchronous electric motor, voltage symmetry in the electrical network, object-oriented programming*

¹ *Victoria V. Romanova, Senior Lecturer.*

¹ *Andrey G. Batukhtin (PhD (Techn.)), Associate Professor.*

¹ *Sergey V. Khromov, Senior Lecturer.*

¹ *Mikhail V. Kobylkin (PhD (Techn.)), Associate Professor.*

² *Konstantin V. Suslov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.*

The work was carried out within the framework of the implementation of the scientific grant of the Council for Scientific and Innovative Activities of the Trans-Baikal State University № 349 – GR dated 03.02.2022.

REFERENCES

1. *Kharlampeva S.S., Gorelov S.V., Sakhnova N.N., Bulygina A.V., Masunov I.G.* Analysis of methods for improving the energy efficiency of energy supply systems // Aktual'nye voprosy energetiki. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Omsk, 2021. Pp. 14–18.
2. *Stepanov V.M., Kosyrikhin V.S.* Calculation methodology and fundamentals for designing power supply systems for objects on a PC // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki, 2015. Issue. 12. Part 2. Pp. 54–66.
3. *Kangro M.V.* Methods for evaluating investment projects: a tutorial. Ulyanovsk: UIGTU, 2011. 131 p.
4. *Vorotnitsky V.E., Morzhin Yu.I.* Digital energy: a new paradigm of functioning and development // Izdatel'stvo MEI, 2019. Pp. 97–113.
5. *Palácios R.S., da Silva I.N., Godoy W.F., et al.* Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults // Soft Computing. 2020. Vol. 24. Pp. 16935–16946.
6. *Romanova V.V., Khromov S.V., Suslov K.V.* Analysis of the influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Kazan': Izd-vo KGEU. 2021. Vol. 23. № 3. Pp. 80–89.
7. *Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Gorpinich A.V., Shvetsova I.A.* Reliability of operation of electrical equipment with reduced quality of electricity // Vesnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: zb. nauk. prats'. Mariupol': Izd-vo PDTU. 2005. Issue. 15. Part 2. Pp. 25–29.
8. *Kovernikova L.I., Shamonov R.G., Sudnova V.V.* The quality of electrical energy, the current state, problems, proposals for their solution: monograph / Novosibirsk: Nauka. 2017. 219 p.
9. *Oleg V. Zapanov, Lidiia I. Kovernikova.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company "Aleksandrovsky mine" // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
10. *GOST 32144–2013.* Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. M.: Standartinform. 2014. 19 p.
11. *Dibowski H., Ploennigs J. and Kabitzsch K.* Automated Design of Building Automation Systems // In IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010 Vol. 57. Pp. 3606–3613.
12. *Ragunathan S., Prasad A., Mishra B.K. and Hsihui Chang.* Open source versus closed source: software quality in monopoly and competitive markets // In IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 2005 Vol. 35. Pp. 903–918.
13. *MATLAB/Simulink* [Electronic resource]. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (accessed 08/06/2022).
14. *PSCAD* [Electronic resource]. <https://www.pscad.com/> (accessed 08/06/2022).
15. *EnergyCS Losses* [Electronic resource]. <https://www.energycs.ru/programs/energycs-loss/> (accessed 06.08.2022).
16. *FreeMath* [Electronic resource]. <http://freemat.sourceforge.net/> (accessed 08/06/2022).
17. *ATM-EMTP* [Electronic resource]. <https://www.eeug.org/> (accessed 08/06/2022).
18. *EnergyCS* [Electronic resource]. <https://www.energycs.ru/> (accessed 08/06/2022).
19. *E3.series* [Electronic resource]. <https://e3series.ru/> (accessed 06.08.2022).
20. *ElectriCA* [Electronic resource]. <https://electrics-soft.ru/> (accessed 08/06/2022).
21. *RTP 3* [Electronic resource]. <http://www.rtp3.ru/> (accessed 08/06/2022).
22. *Flow 3* [Electronic resource]. <https://www.flow3d.com/> (accessed 08/06/2022).
23. *Fazonord quality* [Electronic resource]. <https://ntcees.ru/tender/Fazonord.pdf> (accessed 08/06/2022).
24. *Asymmetry* [Electronic resource]. http://niing.ru/production-obsego-primenenia/software/rtkz_2 (accessed 08/06/2022).
25. *Romanova Victoria.* Determination of optimal location for installation of symmetry facilities in 0.4 kV power supply systems with motor-drive load // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 58. 03014. 9 p.
26. *Incomplete Guide to SQLite for Windows Users* [Electronic resource]. <http://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/10100/1/> (accessed 07/27/2022).
27. *Balancing transformers* [Electronic resource]. <https://et-spb.ru/transformatory-simmetrirujushhie/tst2/> (accessed 08/06/2022).
28. *Normal quality normalizers* [Electronic resource]. <https://normel.ru/> (accessed 08/06/2022).
29. *Transformers brand TMGSU* [Electronic resource]. <http://www.mitek.spb.ru/catalog/id12/> (accessed 06.08.2022).

30. *Booster transformers type TVMG* [Electronic resource]. https://www.tehenergoholding.ru/index.php?menu_id=84&menu_parent_id=83 (accessed 06.08.2022).
31. *Milano M., Van Hoeve W.* Reduced cost-based ranking for generating promising subproblems // *Lecture Notes in Computer Science*. 2004. Vol. 2470. p. 16.
32. *Mollah M.A.S., Rouf M.A., Rana S.M.S.* A study on capital budgeting practices of some selected companies in Bangladesh // *PSU Research Review*. 2021. Vol. 5. p.13.
33. *Romanova V.V., Khromov S.V.* Operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors under voltage asymmetry // *Problems of energy and resource saving*. Tashkent: Publishing House of Tashkent State Technical University. 2019. № 4. Pp. 136–148.