

УДК 517.977

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.015](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.015)

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОСТИ НАГРУЗКИ ФАЗ В ТРЁХФАЗНОЙ СЕТИ 0,4 КВ

Ю.А. Клименко¹, А.П. Преображенский¹, О.Н. Чопоров²

¹*Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия*

²*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

¹*e-mail: klm71165@mail.ru*

²*e-mail: choporov@mail.com*

Резюме: Актуальность исследования обусловлена основными требованиями Федерального Закона от 23.11.2009 года № 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ". В работе рассматривается возможность создания комплекса контроля и управления качеством электроэнергии (КК и УКЭЭ) в распределительных сетях 10/0,4 кВ, особенно в отдалённых и труднодоступных районах сельских местности. Проблема несоответствия качества поставляемых сетевыми и энергосбытовыми организациями энергоресурсов требованиям ГОСТ, состоит в физической и моральной изношенности энергетического оборудования, несоответствии технических параметров линий электропередач современному уровню потребления энергоресурсов, величине потерь электроэнергии. Данное исследование направлено на реконструкцию электрических сетей и улучшения качества поставляемых энергоресурсов потребителям. Результат достигается применением адаптивных систем на основе контроля и управления параметрами состояния электрической сети (электрическое напряжение, электрический ток, коэффициент мощности, активная и реактивная мощность), интеллектуального распределения электрических мощностей между потребителями. Материалы работы представляют практическую ценность для энергетических сетевых, проектных организаций и предприятий по реализации электрооборудования, а так же для потребителей электроэнергии.

Ключевые слова: распределительная сеть, процесс, качество, электроэнергия, адаптивная система, управление, критерий, алгоритм.

Для цитирования: Клименко Ю.А., Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Адаптивная система управления для устранения несимметричности нагрузки фаз в трёхфазной сети ВЛ (КЛ) - 0,4 Кв. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KlimenkoSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.015

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR ELIMINATING THE ASYMMETRICITY OF PHASE LOAD IN A THREE-PHASE NETWORK 0.4 KV

Y.A. Klimenko¹, A.P. Preobrazhenskiy¹, O.N. Choporov²

¹*Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation*

²*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation*

Abstract: The relevance of the study is due to the basic requirements of the Federal Law of November 23, 2009 No. 261-ФЗ "On energy conservation and on improving energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation." The paper considers the possibility of creating a complex of control and management of the quality of electricity in 10 / 0.4 kV distribution networks, especially in remote and inaccessible areas of rural areas. The problem of the mismatch of the quality of energy supplied by network and energy supply organizations with the requirements of GOST is the

physical and moral deterioration of energy equipment, the mismatch of the technical parameters of power lines with the current level of energy consumption, and the amount of energy loss. This study aims to reconstruct electrical networks and improve the quality of energy supplied to consumers. The result is achieved by the use of adaptive systems based on monitoring and controlling the state parameters of the electric network (electric voltage, electric current, power factor, active and reactive power), intelligent distribution of electric capacities between consumers. The materials of the work are of practical value for energy network, design organizations and enterprises for the sale of electrical equipment, as well as for consumers of electricity.

Keywords: text recognition, mobile application, computer vision, algorithm.

For citation: Klimenko Y.A., Preobrazhenskiy A.P., Choporov O.N. Adaptive control system for eliminating the asymmetry of phase load in a three-phase VL (CL) network - 0.4 KV. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(4). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KlimenkoSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.015 (In Russ).

Введение

Процесс контроля качества электроэнергии (ЭЭ) в распределительных электрических сетях состоит из операций по определению состояния параметров сети и их изменению [1] с целью приведения данных параметров в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013. [2].

Повышение эффективности производства зависит от поставок потребителям энергоресурсов в соответствии с требованиями Законов РФ, ГОСТ, отраслевыми и другими нормативными документами. Электроэнергия используется во всех областях человеческой жизнедеятельности: промышленность, сельское хозяйство, транспорт, торговля, быт. От обеспечения качества электроэнергии напрямую зависит надёжность энергоснабжения, сроки эксплуатации и режимы работы технологического оборудования, безопасность человека. Отечественное электрооборудование повсеместно морально и физически устаревает. Новые высокоинтеллектуальные системы, применяемые сегодня, очень требовательны к параметрам качества электроэнергии.

Вопросу обеспечения качества поставляемой электрической энергии потребителям, уделяется недостаточное внимание, особенно в распределительных сетях 10/0,4 кВ. Потери электроэнергии очень высоки, что влияет на энергетическую эффективность предприятий страны.

Применение новых научных разработок в этой области энергетики должно быть направлено на совершенствование сетевого хозяйства поставщиков энергоресурсов, модернизацию технологического оборудования промышленных, сельскохозяйственных и бытовых потребителей электроэнергии.

Обеспечение качества электрической энергии является одним из главных направлений повышения эффективности и надёжности функционирования распределительных электрических сетей. Показатели и нормы качества ЭЭ установлены ГОСТ 32144-2013 [2]. В настоящее время контроль соответствия показателей качества ЭЭ в распределительных сетях 10/0,4 кВ практически не осуществляется со стороны сетевых организаций, а также отсутствует правовая ответственность за их несоблюдение. Без глубокого научного анализа процесса оптимизации невозможно разрабатывать технологическое, алгоритмическое и программное обеспечение мероприятий по контролю и регулированию показателей качества.

Целью данной работы является разработка адаптивной системы управления для комплекса контроля и управления качеством электроэнергии участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ и решение задачи оптимизации технологического процесса

контроля качества электрической энергии путём разработки алгоритма контроля и управления, а также подсистемы технологического процесса контроля качества.

Адаптивная система управления

Адаптивная система управления для устранения несимметричности нагрузки фаз будет использоваться в концепции создания комплекса контроля и управления качеством ЭЭ участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ (Рисунок 1). Комплекс управления участком распределительной сети по контролю и управлению качеством ЭЭ представляет собой симбиоз электрической и телекоммуникационной сетей, технологического оборудования, программного обеспечения и состоит из центрального управляющего комплекса (ЦУК), измерительных управляющих комплексов по 10 кВ и 0,4 кВ (ИУК), удалённых измерительных пунктов (УИП).

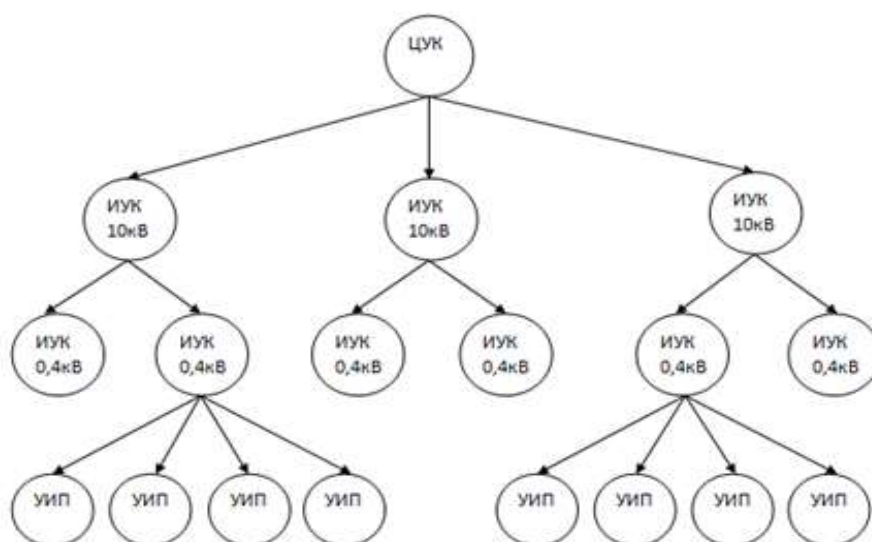


Рисунок 1 – Схема комплекса контроля и управления качеством электроэнергии участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ

Результатом применения адаптивной системы управления является равномерное распределение однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети, повышение энергетических характеристик сети. Схема участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ с использованием адаптивной системы управления представлена на Рисунок 2., где, КТП 10/0,4 кВ - комплектная трансформаторная подстанция; УИК - управляющий измерительный комплекс; УИП - удалённый измерительный пункт; АМ - адаптационный модуль управления энергоснабжением потребителя; П - электрооборудование потребителя.

УИК располагаются на подстанциях 10/0,4 кВ (Рисунок 3). УИП размещается на конечных опорах ВЛ-0,4 кВ (Рисунок 4) и выполняет следующие основные функции: контроль показателей качества ЭЭ; сбор, обработка, передача данных в ЦУК. УИП следует.

АМ предназначен для равномерного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети включает в свой состав измерительное устройство (ИУ), устройство выбора фаз (коммутатор) (УВФ), устройство управления и передачи данных (УУиПД), устройство связи (УС), дистанционный пульт управления (ДПУ) (Рисунок 5).

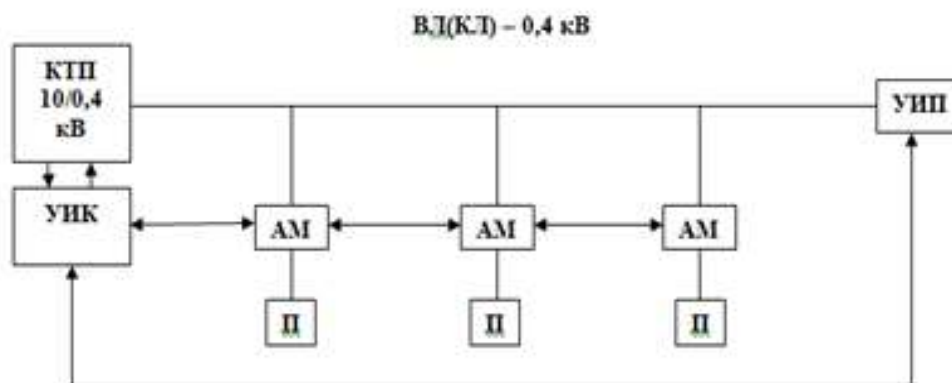


Рисунок 2 – Схема адаптивной системы управления для устранения несимметричности фаз участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ



Рисунок 3 – Структурная схема управляющего измерительного комплекса 0,4(10) кВ



Рисунок 4 – Структурная схема управляющего измерительного пункта 0,4(10) кВ

АМ работает следующим образом. Электроснабжение каждого потребителя осуществляется через АМ, который устанавливается на опоре линии электропередачи в месте подключения ответвления ВЛ (КЛ) - 0,4 кВ.



Рисунок 5 – Структурная схема адапционного модуля управления энергоснабжением потребителя

Электропитание подаётся на входные контакты А,В,С,Н АМ по фазам. ИУ определяет величину параметров электросети по каждой из фаз: электрического напряжения, токовой нагрузки, коэффициента мощности, электрической мощности потребления электроэнергии (полной, активной, реактивной) и других. ИУ направляет данные о состоянии электросети в УУиПД для анализа данных с точки зрения соответствия нормативам ГОСТ. УУиПД каждого АМ передаёт данные о состоянии электрической сети в каждом конкретном пункте ВЛ (КЛ) - 0,4 кВ через УС в ИУК для обработки данных измерений и принятия решения на переключение определённых потребителей для симметрирования нагрузок по фазам линии электропередачи (ЛЭП), а также передаёт управляющие команды конкретным АМ для переключений на выбранные фазы для выравнивания нагрузок. УУиПД обрабатывает принятую информацию и передаёт команду в УВФ на переключение определённого потребителя на фазу, которая соответствует заданным требованиям. УВФ, получив команду, производит переключение энергоснабжения потребителя на заданную фазу и сообщает в УУ и ПД информацию в ИУК о выполнении переключения.

Разработка подсистемы оптимизации параметров процесса управления адаптивной системы

Структуру модели оптимизации процесса управления адаптивной системы управления (Рисунок 6) для устранения несимметричности нагрузки фаз участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ можно представить следующим образом:

1. Модуль расчёта параметров.

Расчёт параметров, характеризующих электрический и другие режимы работы адаптивной системы управления. Оценка параметров должна быть выполнена с использованием разработанной в рамках натурно - модельного подхода балансовой модели процесса, которую условно можно разделить на две части – модель базового состояния и прогнозирующую модель. Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценить состояние адаптивной системы управления и влияние

входных параметров на электрический и другие режимы с использованием всей фактически доступной информации о параметрах процесса. Прогнозирующая модель на основании результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели процесса в случае изменения условий работы [3] адаптивной системы управления.

Расчёт коэффициентов влияния входных параметров на показатели сети и на показатели режимов работы адаптивной системы. Проводится расчёт коэффициентов влияния типа, состава и структуры электротехнического компонента на технико-технические показатели режима процесса работы адаптивной системы управления. Далее, учитывая линейность модели, считаются постоянными при решении задач прогноза оптимизации. Анализируя возможность линеаризации математической модели процесса, определяются допустимые пределы изменения режимных параметров и их применение для решения задачи оптимизации методов линейного математического программирования.

1. Модуль расчёта параметров и условий работы адаптивной системы управления.

Планируемые средние значения параметров электросети. Задание планируемых средних параметров расхода в зависимости от вида,

состава и свойств энергетического компонента. С применением перерасчётных коэффициентов модели и справочных данных вычисляется распределение ресурсов на расчётный период. Учёт технического состояния оборудования, графиков технического обслуживания и ремонта, плановых остановок определяется методами экспертных оценок.

Ограничения для адаптивной системы при отклонении значений параметров электросети. Задание ограничений для адаптивной системы управления на поступление, расход ресурсов (электроэнергии).

Технологические ограничения для адаптивной системы и электросети. Задание технологических ограничений согласно тактико-технических данных оборудования, характеризующих режимы работы.

2. Модуль решения задачи оптимизации.

Выбор оптимальных значений параметров сети. Принимается решение задачи оптимальности параметров с возможностью корректировки величин с учётом наложенных ограничений режимов работы адаптивной системы управления.

Выбор оптимального распределения энергетических ресурсов. Формализуются ограничения на режимы работы адаптивной системы управления для создания оптимального соотношения параметров в заданном интервале.

Выбор оптимального режима функционирования и других параметров нормального процесса функционирования адаптивной системы управления.

3. Модуль анализа полученных результатов.

Определение оптимальных значений параметров. Особенностью решения оптимизационных задач математического программирования является то, что в процессе реализации возникают случаи, когда наложенные ограничения противоречивы и не имеется области допустимых решений. Поэтому предусмотрен модуль анализа принятия решений и при отсутствии конечного результата в решении задачи при противоречивости условий действует процесс коррекции [4].

Определение лимитирующих параметров. Оптимальное распределение энергетических ресурсов является важной задачей, определяющей технологические показатели работы адаптивной системы управления.



Рисунок 6 – Структура модели оптимизации адаптивной системы управления

Анализ причин не принятия решения оптимизации. Для этого необходимо иметь методику оценки эффективности использования данного ресурса и осуществление его оптимального распределения.

Алгоритм последовательности решения задачи расчёта оптимального режима работы адаптивной системы управления для устранения несимметричности нагрузки фаз (Рисунок 7) участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ можно описать следующим образом:

- осуществляется контроль значений параметров сети в точках размещения УИК, АМ, УИП;
- производится расчёт в УИК, АМ фактических и оптимальных величин потребляемых мощностей;
- определяется наличие несимметрии напряжений, мощностей по фазам линии электропередач (ЛЭП);
- определяется необходимость и возможность выравнивания загруженности фаз ЛЭП путём перераспределения мощностей потребителей по фазам;
- производится обработка полученных данных о состоянии сети и осуществляется принятие решения по переключению отдельных потребителей на менее загруженные фазы, отвечающие заданным требованиям;
- производится автоматическое аппаратное переключение отдельных потребителей в АМ на выбранные фазы;
- осуществляется контроль значений параметров сети с целью проверки

отсутствия несимметрии в распределении мощностей (нагрузок) по фазам электрической сети.

Целевая функция процесса контроля и управления качеством ЭЭ

Качество ЭЭ в распределительных сетях зависит от множества параметров технологического процесса состоит из следующих друг за другом циклических операций. Главной задачей данного технологического процесса является формирование выходных показателей качества ЭЭ в соответствии с допусками ГОСТ 32144-2013 [2].

Для этой цели применяются:

- методы оптимизации;
- методы адаптивного управления;
- корреляционный анализ.

В алгоритмах управления технологическим процессом постоянно ведётся учёт неконтролируемых параметров сети [4, 5].

Структура модели ТП состоит из моделей отдельных операций (действий). Поэтому нужно реализовывать модель ТП и моделей операций (действий) ТП в целом для применения в управляющем алгоритме. Управление в ТП помогает создать алгоритм выбора и коррекции режима работы технологического оборудования [6], позволяющий улучшить качество ЭЭ и уменьшить потери ЭЭ в распределительных электрических сетях.

Ведущим показателем эффективности ТП контроля качества ЭЭ является значение параметров ЭЭ в сети, что зависит от отлаженности ТП, используемых методов контроля, применяемого технологического оборудования.

Условия управления ТП:

- постоянная поддержка технических характеристик входных и выходных параметров в строгом соответствии с предъявляемыми требованиями качества ЭЭ;
- выполнение технологических операций в соответствии с разработанными алгоритмами, которые синхронизируют включение, выключение, изменение управляющего действия на ТП и технологическое оборудование;
- постоянная коррекция параметров ТП со стороны управляющей системы в связи с амортизацией технологического оборудования.

Целостная модель ТП представляет собой логическую очередность отдельных технологических операций.

Представим (i-1) операцию ТП в виде:

$$U_i = F(U_{i-1}, V_i), \quad (1)$$

где, U_{i-1} - параметры качества ЭЭ; V_i - вариант реализации ТП.

Учитывая, что требуются не сами параметры качества, а зависящие от них технические параметры технологического оборудования, такие как быстродействие, надёжность и другие. Представляем в следующем виде:

$$g_i = F^*(V_{i-1}, k_i), \quad (2)$$

где, V_{i-1} - контролируемые параметры; k_i - технические параметры технологического оборудования.

Видим, что процесс контроля качества ЭЭ можно представить как преобразование одного состояния в другое в виде определённой графической траектории.

Если основной целью ТП будет получение заданных показателей качества ЭЭ, то необходимо получить множество траекторий (функций) для использования в управлении ТП, чтобы производить коррекцию по финальному состоянию. В реальности,

необходимо подобрать определённые величины управляющих влияний, так, чтобы выходные параметры максимально соотносились с требуемыми, для чего требуется решить задачу траекторного управления и найти такое решение с учётом заданных характеристик, которое будет оптимальным [7, 8].

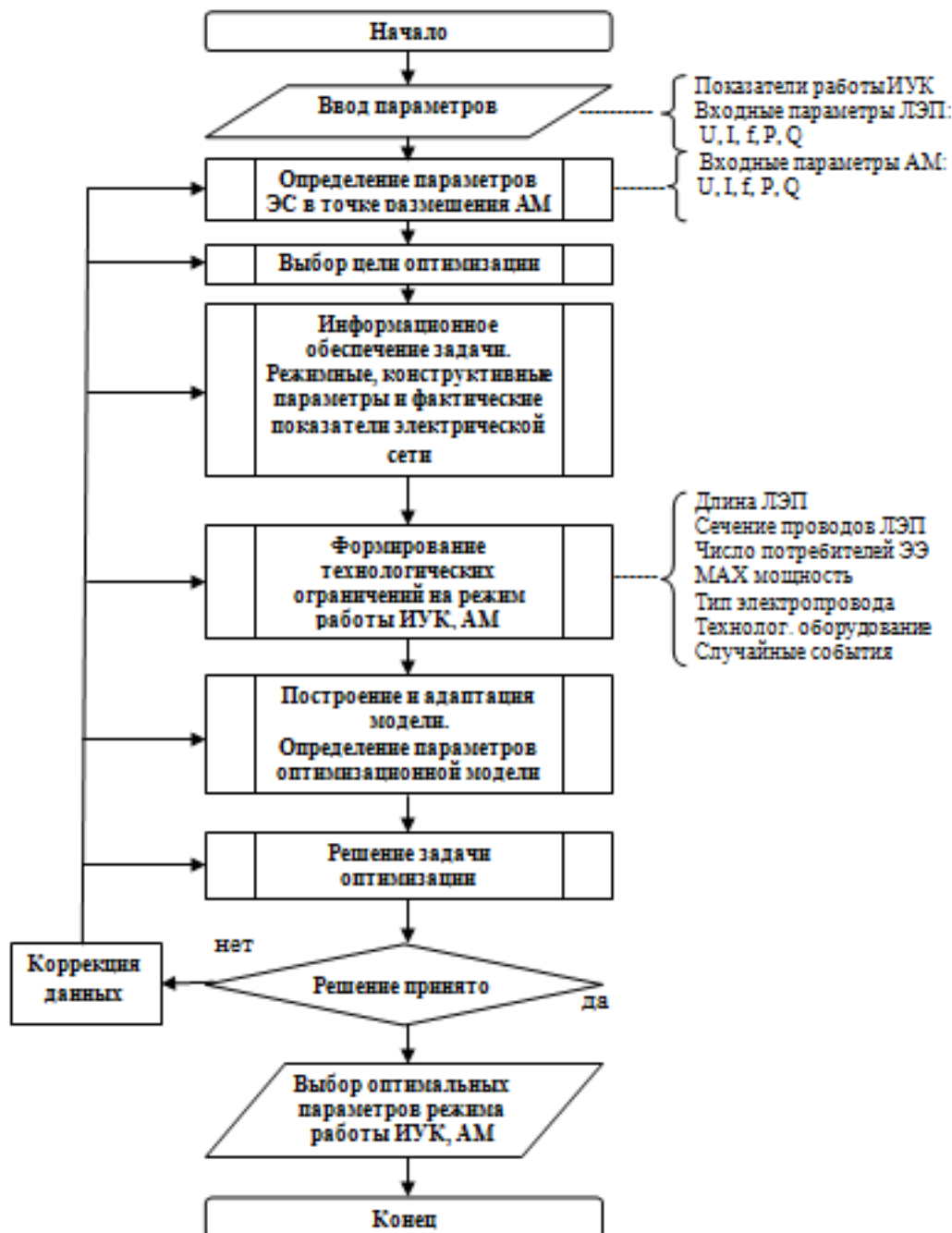


Рисунок 7 – Алгоритм последовательности решения задачи расчёта оптимального режима работы адаптивной системы управления для устранения несимметричности нагрузки фаз

Исходные данные для проектирования системы управления представлены в виде определённой базовой технологии. При выборе технологии устанавливаются порядок следования операций и ограничения управляющих переменных.

Целевую функцию представляем в виде уравнения для числа операций (n-1):

$$F_{\varphi} = G(K_1 \dots K_n, C_1 \dots C_n), \quad (3)$$

где, $K_1...K_n$ - выходные характеристики ТП; $C_1...C_n$ - управляющие переменные ТП.

Управляющие переменные процесса - это величины, значения которых выбираются управляющей системой для коррекции параметров сети.

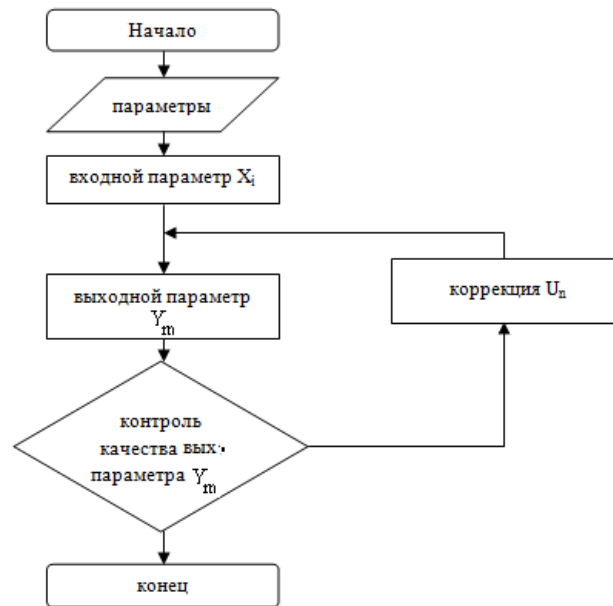


Рисунок 8 – Алгоритм управления параметрами технологического процесса контроля качества электроэнергии

Если применить параметр ϕ_i , определяющий цель для операции i , то

$$f_{n-1}(K_n) = \min(\phi_i [K_n, C_{n-1}] + f_{n-2}(K_{n-1})) = \min C_{n-1}(K_n, C_{n-1}) \quad (4)$$

Для ТП с одной операцией выражение представим в виде:

$$f_1(K_2) = \min(K_2, I_1) \quad (5)$$

В связи с тем, что:

$$f_0(K_1) = 0 \quad (6)$$

Получаем целевую функцию для ТП:

$$C_2(K_2, C_1) = \varphi(K_2, C_1) \quad (7)$$

Принципиальная схема контроля и управления качества ЭЭ представлена на Рисунке 5.

Работа системы оптимизации как части системы управления [9, 10] организуется так, что, если в текущий момент времени, значение выходного параметра не соответствует требуемому значению, то с использованием управляющих устройств, осуществляется корректирующее воздействие на технологический процесс с целью изменения значения выходного параметра на соответствующее требуемому значению, которое сохраняется в подсистеме сбора данных.

Предусмотрены следующие варианты целевых функций:

- минимум затрат при распределении электрических мощностей:

$$F = P \rightarrow \min_{X_{im} \in X_m}$$

- максимум производительности:

$$F = P \rightarrow \max_{X_{im} \in X_m}$$

где i – индекс параметров сети;

X_{it} – вектор, характеризующих параметры сети;

$X_{it} \in G_{xt}$ – ограничения на параметры сети;

G_{xt} – область допустимых решений перераспределения мощностей.

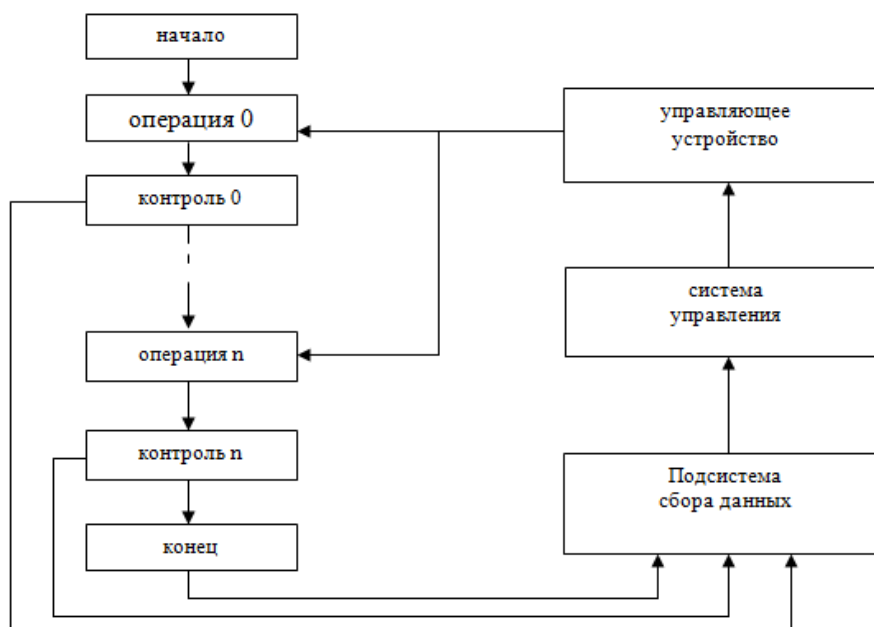


Рисунок 9 – Принципиальная схема контроля и управления качеством электрической энергии

Программное обеспечение подсистемы расчёта оптимального распределения электрических мощностей позволяет решать задачи оптимального их распределения в следующих технологических ситуациях:

- при изменении симметрии в распределении мощностей по фазам ;
- при изменении максимального значения мощности ;
- при изменении количества потребителей;
- при изменении требований задания на объем производимого пара;
- при изменении требований обеспечения максимума экономии электроэнергии, обеспечения максимума производительности, экономичности работы адаптивной системы управления.

Алгоритм выделения главного критерия качества ЭЭ адаптивной системы управления

Основной задачей оптимизации является приведение целевой функции к её оптимальному значению:

$$F(x) \rightarrow opt. \quad (8)$$

Для многокритериальной оптимизации

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, X \in D, F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, D \subseteq S, \quad (9)$$

где X – вектор независимых переменных в области допуска D ; D – множество допустимых значений переменных; x_1, x_2, \dots, x_n – неизвестные, которые являются управляемыми объектами в задаче оптимизации ТП; S – пространство оптимизации.

Данное уравнение (9) представляет собой задачу оптимального выбора управляемых параметров технологической системы, где заданы n функции критериев f_k , $k=1...n$ существуют определённые технологические ограничения ($X \in D$), например, технологические характеристики оборудования.

Взаимодействие критериев между собой может быть нейтральным, но может быть и взаимопротиворечащим, что является дополнительной проблемой в оптимизации [11].

Функционирование адаптивной системы определяется выходными параметрами качества ЭЭ, поэтому целевая функция:

$$F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)], \quad (10)$$

т.е. $F(x)$ постоянно к максимуму для X в оптимизационной области S , в котором существует ограниченное число допустимых решений A_d . Также, возможно присутствие противоречащих друг другу параметров качества ЭЭ [12]. Выявляем такой вариант математической модели, при которой обеспечивается максимум целевой функции:

$$K(v_i) = \max \sum_{k=0}^{n-1} (g_k(v_i)) \quad (11)$$

$$g(v_i^1) \geq g(v_k) \quad (12)$$

где

$$g_k(v_i) = \sum_{i=0}^{l-1} (g_k(p_i)) \quad (13)$$

значения видовых параметров качества;

$k=0, 1, \dots, m-1$ - значения параметров качества;

p_l и v_i – совокупность видов параметров качества;

$K(v_i)$ - обобщённый параметр качества (ЦФ);

g_k^l - ограничения значений параметров качества .

Описание работы алгоритма выделения основного параметра качества (Рисунок 10):

- 1) Производится получение данных о состоянии параметров электросети, упорядочивание параметров. Согласно значениям, рассматриваются критерии для каждой из подсистем и сортируются по типу возрастания или убывания. Вводится параметр суммы последних значений по типам, который является приоритетным решением для данной системы с минимальными затратами ресурсов и др.;
- 2) Производится вычисление допуска для всех подсистем: e – номер подсистемы;
- 3) Производится отбор и исключение из процесса e -систем, которые имеют значения отличные от значений параметра Но если, хотя бы для одной из подсистем отсутствует допустимое решение, то нужно расширить количество ограничений и вернуться к пункту 1 алгоритма;
- 4) Производится переход к следующему критерию качества до той поры, пока не будут рассмотрены все критерии;
- 5) Производится вычисление значений целевой функции;
- 6) Производится определение допуска для целевой функции :

$$f(v_i) \geq f_i^{min} = \frac{f_{max} + f_{i-1}^{min}}{2}, \quad (14)$$

где $f_{i-1}^{min} = f^{min}$, f^{min} – сумма минимальных значений целевой функции каждой подсистемы;

1) Производится контроль выполнения основного условия по наличию необходимого решения в каждой из подсистем и при отсутствии таких решений, соответственно, расширяется область ограничений для целевой функции;

8) В результате работы данного алгоритма принимается решение по выбору главного критерия качества, полученного в результате завершающей итерации.

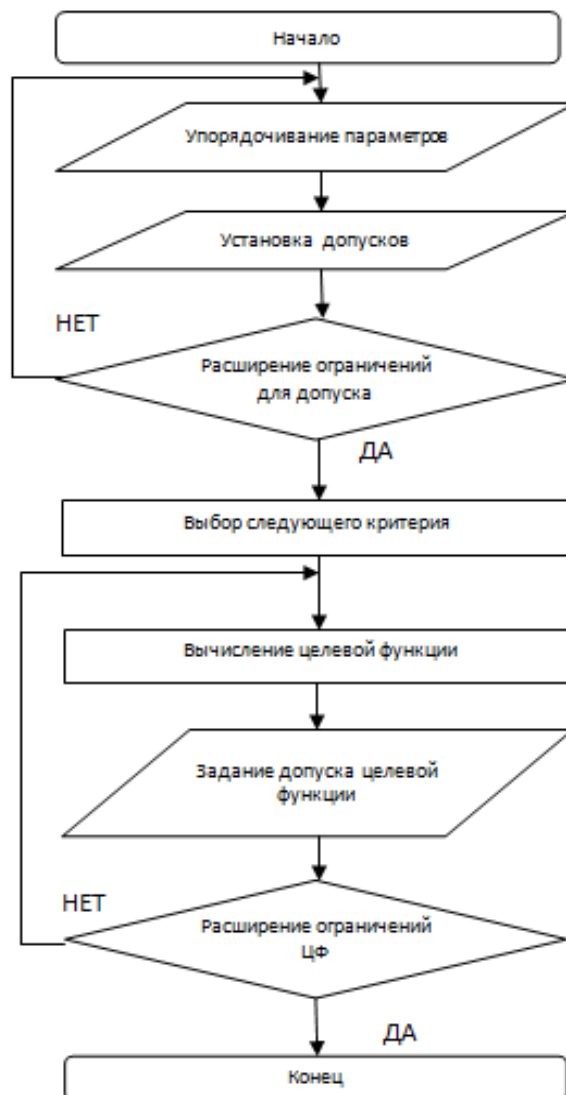


Рисунок 10 – Алгоритм выделения главного критерия качества ЭЭ адаптивной системы управления

Результаты

На основе предлагаемых подходов были проведены тестовые расчеты, демонстрирующие работоспособность предлагаемых моделей и алгоритмов.

Исследована задача N 1, где рассматривается ВЛ-0,4 кВ, питающая электроэнергией 12 бытовых потребителей, оснащённая адаптивной системой управления. Подключение бытовых потребителей равномерно распределено по фазам: А - 1,4,7,10; В - 2,5,8,11; С - 3,6,9,12. Адаптивной системой управления осуществляется постоянный дискретный контроль величин фазных и линейных напряжений в сети по фазам А,В,С электросети. В случае изменения величины фазного напряжения (уменьшения более 10%) в одной из фаз (А) адаптивной системой управления фиксируется падение фазного напряжения ниже 98 В из-за включения потребителями 1

и 4 мощных электроприёмников происходит падение напряжения у бытовых потребителей 7 и 10. На фазах В и С изменения фазного напряжения незначительны и соответствуют допускам. Адаптивная система управления проводит анализ и осуществляет переключение бытового потребителя 1 с фазы А на фазу В. Происходит выравнивание фазных напряжений по фазам ВЛ-0,4 кВ. На базе предложенных подсистем произошел процесс перераспределения энергетических ресурсов. При этом число итераций в процедуре оптимизации не превысило 23.

Исследована задача N 2, где рассматривается ВЛ-0,4 кВ, питающая электроэнергией 12 бытовых потребителей, оснащённая адаптивной системой управления. Подключение бытовых потребителей равномерно распределено по фазам: А - 1,4,7,10; В - 2,5,8,11; С - 3,6,9,12. Средняя величина потребляемой мощности одним абонентом в среднем составляет примерно 5 кВт, соответственно нагрузки по фазам сети составляют: фаза А - 21 кВт, фаза В - 20 кВт, фаза С - 19 кВт. Бытовой потребитель 4 на фазе А включает дополнительно электроприёмник мощностью 9 кВт, что приводит к изменению равномерного распределения мощностей по фазам электросети. Адаптивной системой управления осуществляется постоянный дискретный контроль величин активной (реактивной) мощности в сети по фазам А,В,С электросети. В случае несимметричности распределения величин мощности по фазам адаптивной системой управления фиксируется изменение распределения энергетических ресурсов. На фазах В и С изменения потребляемых мощностей незначительны. Адаптивная система управления проводит анализ и осуществляет переключение бытового потребителя 1 с фазы А на фазу В. и потребителя 7 на фазу С. Происходит выравнивание нагрузок по фазам ВЛ-0,4 кВ. На базе предложенных подсистем произошел процесс перераспределения энергетических ресурсов. При этом число итераций в процедуре оптимизации не превысило 18.

Заключение

В представленной статье рассмотрены вопросы разработки адаптивной системы управления для комплекса контроля и управления качеством электроэнергии участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ и решения задачи оптимизации технологического процесса контроля качества электрической энергии путём разработки структуры модели процесса управления адаптивной системы управления с применением алгоритмов последовательности решения задачи расчёта оптимального режима работы адаптивной системы управления, управления параметрами технологического процесса контроля качества электроэнергии, выделения главного критерия качества ЭЭ адаптивной системы управления контроля и управления, а также подсистемы оптимизации процесса контроля показателей качества электрической энергии и управления ими.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведён анализ основных подходов к управлению качеством. Управление качеством должно быть системой, включающей в себя разработку, производство и эксплуатацию адаптивной системы управления для комплекса контроля и управления качеством электроэнергии участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ. Задачей контроля и управления качеством является установление причин ухудшения показателей качества и обеспечение их соответствия установленным нормам.

2. Исследован технологический процесс контроля качества ЭЭ и определено влияние системы управления на выходные параметры (показатели качества) процесса. Необходимо комплексное внедрение подсистемы оптимизации для эффективности контроля и управления качеством.

3. Проведён анализ возможности применения различных многокритериальных методов выделения главного критерия качества. Для выбора лучшего технического решения предложено использовать модернизированный метод выделения главного критерия с целью упрощения процесса формирования коэффициентов значимости критериев (показателей) качества для эффективности порядка оценки технической реализации задач системы управления качеством.

4. Разработаны структурные схемы комплекса контроля и управления качеством электроэнергии участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ, адаптивной системы управления для устранения несимметричности фаз участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ, управляющего измерительного комплекса, удалённого измерительного пункта, адаптационного модуля управления энергоснабжением потребителя, а так же алгоритмы последовательности решения задачи расчёта оптимального режима работы адаптивной системы управления, управления параметрами технологического процесса контроля качества электроэнергии, выделения главного критерия качества ЭЭ адаптивной системы управления контролем и управлением, что позволяет нам позволяет оценить возможность проведения контроля и управления для приведения параметров электросети в соответствие с требованиями качества ЭЭ и для дальнейшего применения в моделировании адаптивных систем контроля качества ЭЭ.

5. На основе предлагаемых подходов были проведены тестовые расчёты, демонстрирующие работоспособность предлагаемых моделей и алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М. Высшая школа, 2003.
2. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, [Электронный источник], / <http://www.garant.ru> / (дата обращения 5.12.2019).
3. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс; 2002.
4. Граничин О.Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания: учебное пособие. СПб; 2003.
5. Кличков В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2011.
6. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир; 1976.
7. Лисьев Г.А., Попова И.В. Технологии поддержки принятия решений. Учебное пособие. М.: ФЛИН-ТА; 2011.
8. Лотов А. В., Поспелова И. И. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. М.: МАКС Пресс; 2008.
9. Меньков А. В., Острейковский В. А. Теоретические основы автоматизированного управления. М.: Оникс; 2005.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь; 1993.
11. Салеев Д. В. Анализ методов многокритериальной оптимизации, применяемых при управлении технологическими процессами. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2013;2(2):11.

REFERENCES

1. Alexandrov A. G. Optimal and adaptive systems - M.: Higher school; 2003.
2. GOST 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. The quality standards of electric energy in general-purpose power supply systems, Available from: <http://www.garant.ru> / (Accessed December 5, 2019).

3. Vasiliev F. P. Optimization methods. M.: Factorial Press; 2002.
4. Granichin O.N. Introduction to stochastic optimization and estimation methods: a tutorial. - SPb: publishing house of St. Petersburg University; 2003.
5. Klichkov V. N. Models and methods of statistical control of a multi-parameter technological process M.: FIZMATLIT; 2011.
6. Kramer G. Mathematical methods of statistics. M.: World; 1976.
7. Lisiev G.A., Popova I.V. Decision support technologies: textbook. allowance. M.: FLINTA; 2011.
8. Lotov A. V., Pospelova I. I. Multicriteria decision-making problems: Textbook. M.: MAX Press; 2008.
9. Menkov A. V., Ostreykovsky V. A. Theoretical foundations of automated control. M.: Onyx; 2005.
10. Saati T. Decision Making. Hierarchy Analysis Method. M.: Radio and communications; 1993.
11. Saleev D. V. Analysis of multicriteria optimization methods used in the management of technological processes. *Modeling, optimization and information technology*. 2013;2 (2):11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Клименко Юрий Алексеевич, аспирант, Кафедра информационных систем и технологий, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

Yuri Alexeevich Klimenko, Postgraduate Student, Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation.

Преображенский Андрей Петрович, профессор, Кафедра информационных систем и технологий, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация
ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)

Preobrazhenskiy Andrey Petrovich, Professor, Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation

Чопоров Олег Николаевич, профессор, Кафедра систем информационной безопасности, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
ORCID: [0000-0002-3176-499X](https://orcid.org/0000-0002-3176-499X)

Choporov Oleg Nikolaevich, Professor, Department of Information Security Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia