

УДК 681.537

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕТОКОМ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ВЫНУЖДЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

<sup>1</sup>Полищук В.И., <sup>1</sup>Шувалова А.А., <sup>2</sup>Панкратов А.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет  
имени И.И. Ползунова», Барнаул, e-mail: polischuk\_vi@mail.ru;

<sup>2</sup>АО «Системный оператор Единой энергетической системы»,  
Томск, e-mail: pankratovav@kuzb.so-ups.ru

Согласно нормативным документам АО «СО ЕЭС», вынужденный режим (нагрузка выше номинальных значений, но ниже аварийного предела) является допустимым, но при этом он должен быть кратковременным. Введение перетоков активной мощности в допустимые пределы возлагается на диспетчерскую службу. Как правило, диспетчер в качестве управляющего воздействия выдает команды либо на ограничение потребителей, либо на отключение части потребителей, что влечет за собой экономические издержки. В то же время в ряде научных работ доказано, что на основе данных о статических характеристиках нагрузки возможно снизить переток активной мощности до 7% путем воздействия на уровень напряжения, что в большинстве случаев позволяет избежать отключения потребителей электроэнергии. В данной работе приведены исследования по созданию интеллектуальной автоматизированной системы управления перетоком активной мощности в вынужденном режиме работы линии электропередач, использующей данные статической характеристики нагрузки. В результате установлено, что синтезированная система управления перетоком активной мощности в вынужденном режиме работы линии на основе данных статических характеристик нагрузки работает логически верно. Снижение уровня перетока в зависимости от регулирующего эффекта нагрузки может достигать 7%.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, нечеткая логика, вынужденный режим энергосистемы, автоматизированное регулирование напряжения под нагрузкой, пропускная способность линии электропередач

## INTELLIGENT AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF ACTIVE POWER FLOW CONTROL BY POWER LINES IN FORCED OPERATION MODE

<sup>1</sup>Polishchuk V.I., <sup>1</sup>Shuvalova A.A., <sup>2</sup>Pankratov A.V.

<sup>1</sup>Federal Budget Educational Institution of Higher Education Polzunov Altai State  
Technical University, Barnaul, e-mail: polischuk\_vi@mail.ru;

<sup>2</sup>«System Operator of the United Power System», Joint-stock Company,  
Tomsk, e-mail: pankratovav@kuzb.so-ups.ru

According to joint-stock company standards «SO UPS», JSC, a mode of loading above face value, but below alarm levels, let us assume, but it should be in short term. Introduction of overflows of active power in a permissible limit is assigned to dispatching service. The dispatcher as operating influence gives out teams or on restriction of consumers, or on switching-off of a part of consumers that bears behind itself economic costs. In too time in a number of scientific works probably decrease in an overflow of active power to 7% by influence on a voltage level is proved, that on the basis of data about a loading direct current characteristic, that in most cases allows to avoid switching-off of consumers of the electric power. This paper presents studies on the creation of an intelligent automated system for controlling the flow of active power in a forced mode of operation of a power line using data from the static characteristics of the load. As a result, it was found that the synthesized system for controlling the flow of active power in the forced mode of line operation based on the data of the static characteristics of the load operates logically correctly. The decrease in the level of overflow, depending on the regulating effect of the load, can reach 7%.

**Keywords:** automated control system, fuzzy logic, forced power system mode, automated voltage regulation under load, transmission line capacity

Несмотря на все возрастающие требования к автоматизации диспетчерского управления, для вынужденного режима работы линии электропередач отсутствуют автоматизированные средства управления, способные быстро вводить переток активной мощности в допустимые пределы. Это связано с отсутствием необходимого арсенала средств управления. Основным средством снижения перегрузки как противоаварий-

ной автоматикой, так и диспетчерской службой являются отключение части потребителей или их ограничение в электроэнергии. В то же время существует целый ряд научных работ, доказывающих возможность снижения перегрузки по линии за счет правильного воздействия на напряжение, основанного на знаниях статических характеристик нагрузок [1–3]. Например, в работе [1] доказано, что при наличии достоверных

данных о статических характеристиках нагрузки (СХН) воздействием на напряжение перетоков активной мощности можно снизить до 7%. Технически изменять напряжение можно за счет увеличения тока возбуждения на генераторе, подключения блоков статических компенсаторов или за счет изменения коэффициента трансформации с помощью РПН. Автоматизация управления силовыми трансформаторами с РПН в сетях – эффективное средство улучшения качества регулирования и поддержания оптимальных режимов [4].

Цель исследования: разработать программный комплекс для системы АРПН, который в режиме перегрузки линии по активной мощности, используя данные СХН, изменяет уровень напряжения в сторону, воздействующую на снижение перетоков активной мощности.

#### Материалы и методы исследования

Статические характеристики нагрузки представляют собой отражение свойства изменения параметров режима (таких как активная мощность, реактивная, полная мощность) при медленно изменяющемся напряжении. При этом СХН обладают крайне полезным эффектом, называемым регулирующим эффектом нагрузки, численным отражением которого является коэффициент регулирующего эффекта нагрузки, для активной мощности  $k_{рэн} = \Delta P / \Delta U$ . Если регулирующий эффект нагрузки близок к нулю, то изменение уровня напряжения не приведет к какому-либо изменению перетока активной мощности. При положительном значении  $k_{рэн}$  увеличение напряжения приводит к увеличению перетока активной мощности, а при отрицательном значении – к снижению перетока активной мощности. Соответственно, при отрицательном значении  $k_{рэн}$  увеличение уровня напряжения приведет к снижению, а при снижении – к увеличению уровня перетока активной мощности [5–7]. Если раньше СХН определяли методом активного эксперимента и получали характерные для разного времени года и разной нагрузки характеристики, то в настоящее время появился ряд методик и даже готовых программных продуктов, например «Идентификатор СХН», способных методом пассивного эксперимента производить постоянный мониторинг СХН [8, 9]. Выходными данными «Идентификатора СХН» являются коэффициенты полинома характеристики СХН по активной и реактивной мощности, а также значение коэффициента регулирующего эффекта нагрузки, представляющего собой первую

производную функции характеристики СХН для измеряемого напряжения.

Автоматизированная система управления перетоком активной мощности в режиме перегрузки (АСУПП) должна состоять из двух основных блоков – блока «Идентификатор СХН» и блока АРПН трансформатора. Поскольку автоматическая выработка управляющего воздействия АСУПП требует учета множества логических условий, при разработке АСУПП за основу был взят математический аппарат нечеткой логики. Основные положения проверялись в программном комплексе математического моделирования Matlab со встроенным пакетом Fuzzy Logic Tollbox. Выбранный математический аппарат основан на алгоритме Мамдани ввиду того, что на данном алгоритме наглядно представляются все используемые параметры.

Для представления работы АСУПП был выбран энергоучасток, на котором система работает на линии без устройств компенсации реактивной мощности, в случае наличия таких устройств система будет несколько усложнена, но логика ее работы будет той же.

На рис. 1 приведена структура нечеткого регулятора активной мощности в режиме перегрузки. На вход подаются 4 параметра: напряжение, положение отпайки РПН, коэффициент регулирующего эффекта нагрузки (РКН) и активная мощность.

Для каждого параметра определены функции принадлежности (термы), которые создаются экспертом на основе своих знаний: напряжение – «Высокое» (В), «Нормальное» (N), «Низкое» (S); мощность – «Недогруз» (S), «Нормальный» (N), «Режим перегрузки» (В); регулирующий коэффициент нагрузки – «Отрицательный» (N), «Нулевой» (0), «Положительный» (P); положение отпайки РПН – «Крайнее малое» (S), «Рабочее положение» (N), «Крайнее большое» (В).

При этом три нормированных параметра подаются на вход нечеткого регулятора из технических средств измерения, а значение регулирующего коэффициента нагрузки поступает на вход нечеткого регулятора с выхода блока «Идентификатор СХН».

На рис. 2 представлены термы входного параметра «Напряжение», которые представляют собой треугольные функции принадлежности (trimf). В качестве численных значений объекта регулирования приняты данные реального силового трансформатора АТДЦТГН-63000/220/110/10, на исследуемой линии  $U_{ном} = 110$  кВ,  $U_{ср} = 112$  кВ,  $P_{ном} = 35$  МВт.

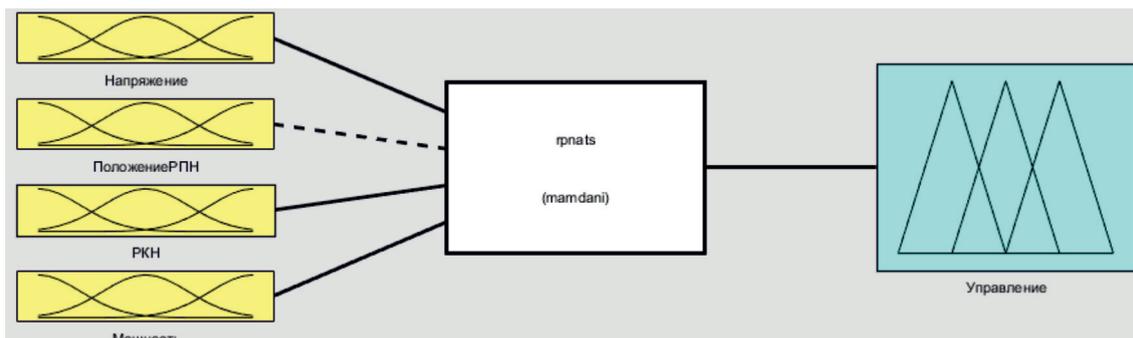


Рис. 1. Структура нечеткого регулятора активной мощности в режиме перегрузки

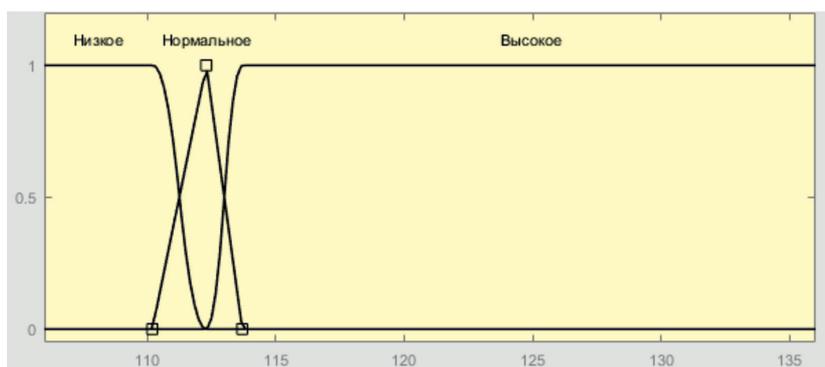


Рис. 2. Термы входного параметра «Напряжение»

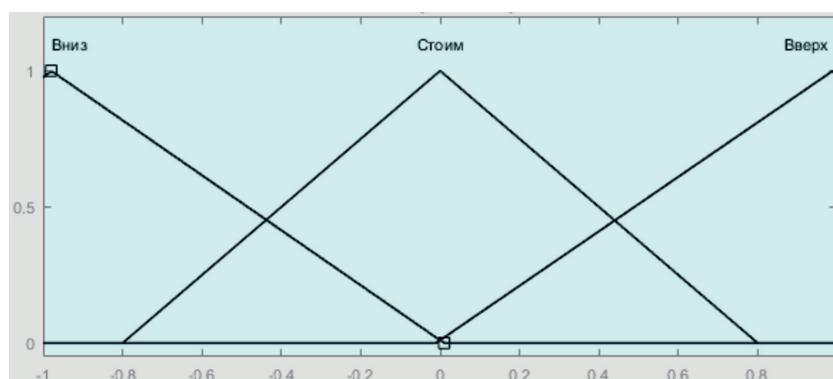


Рис. 3. Термы выходного сигнала

Аналогично созданы термы для всех трех остальных входных параметров, при этом особенностью создания термов для положения РПН является применение трапециевидной функции принадлежности (*trapmf*) для положений от второго до предпоследнего.

На выходе нечеткого регулятора формируется выходной управляющий сигнал на переключение РПН, для которого также созданы термы, представленные на рис. 3.

Создание лингвистических значений всех параметров дало возможность сформировать логическую взаимосвязь между параметрами и управляющим сигналом на основе базы правил.

База правил формировалась исходя из следующих требований: управляющий сигнал на изменение напряжения в режиме недогрузки вырабатывается на основе данных сравнения имеющегося напряжения и уставки по напряжению, т.е. АРПН поддерживает заданную величину напряжения. В вынужденном режиме управляющий сигнал вырабатывается на основе данных мощности и регулирующего эффекта нагрузки. Изменение напряжения при этом должно приводить к снижению перетока активной мощности. При номинальном значении перетока активной мощности управляющий сигнал на РПН поступать не должен.

База правил представляет собой структурированный текст вида:

Правило 1\_ЕСЛИ «Напряжение = Норма (N)» И «Положение отпайки РПН = Крайнее малое (S)» И «РКН = 0» И «Мощность = Недогруз (S)» ТО «Управление = Стоим»

...

Правило 45\_ЕСЛИ «Напряжение = Низкое (S)» И «Положение отпайки РПН = Рабочее положение (N)» И «РКН = Положительный (P)» И «Мощность = Перегруз (B)» ТО «Управление вверх»

Созданные правила сведены в таблицу.

База правил

№	U	Поло- жение отпайки	P	Кр	Управле- ние	№	U	Поло- жение отпайки	P	Кр	Управле- ние	№	U	Поло- жение отпайки	P	Кр	Управле- ние
1	N	S	S	–	0 (стоим)	16	N	B	N	–	0 (стоим)	31	N	P	B	0	0 (стоим)
2	B	S	S	–	U↓(вверх)	17	B	B	N	–	0 (стоим)	32	B	P	B	0	0 (стоим)
3	S	S	S	–	0 (стоим)	18	S	B	N	–	U↑(вниз)	33	S	P	B	0	0 (стоим)
4	N	S	N	–	0 (стоим)	19	N	S	B	N	0 (стоим)	34	N	B	B	0	0 (стоим)
5	B	S	N	–	0 (стоим)	20	B	S	B	N	0 (стоим)	35	B	B	B	0	0 (стоим)
6	S	S	N	–	0 (стоим)	21	S	S	B	N	0 (стоим)	36	S	B	B	0	0 (стоим)
7	N	P	N	–	0 (стоим)	22	N	P	B	N	U↑(вниз)	37	N	S	B	P	U↓(вверх)
8	B	P	S	–	U↓(вверх)	23	B	P	B	N	U↑(вниз)	38	B	S	B	P	U↓(вверх)
9	S	P	S	–	U↑(вниз)	24	S	P	B	N	U↑(вниз)	39	S	S	B	P	U↓(вверх)
10	N	P	N	–	0 (стоим)	25	N	B	B	N	U↑(вниз)	40	N	P	B	P	U↓(вверх)
11	B	P	N	–	0 (стоим)	26	B	B	B	N	U↑(вниз)	41	B	P	B	P	U↓(вверх)
12	S	P	N	–	0 (стоим)	27	S	B	B	N	U↑(вниз)	42	S	P	B	P	U↓(вверх)
13	N	B	S	–	0 (стоим)	28	N	S	B	0	0 (стоим)	43	N	B	B	P	U↓(вверх)
14	B	B	S	–	U↓(вверх)	29	B	S	B	0	0 (стоим)	44	B	B	B	P	U↓(вверх)
15	S	B	S	–	U↑(вниз)	30	S	S	B	0	0 (стоим)	45	S	B	B	P	U↓(вверх)

### Результаты исследования и их обсуждение

Корректность работы нечеткого регулятора первоначально проверялась путем задания характерных режимов. Например, на рис. 4 показан режим работы, при котором напряжение «Низкое» ниже уставки (112 кВ), переток активной мощности «Недогруз» ниже номинала (30 МВт), положение РПН «Рабочее» (12 из 23), поэтому регулирующий коэффициент нагрузки не учитывается и управляющий сигнал «Вниз» (–0,669), что приведет к переключению на одну ступень РПН ниже (11), и напряжение должно повыситься. Следовательно, процесс регулирования ведется исходя из уставки по напряжению.

Результаты других характерных режимов в виде иллюстрации управляющего сигнала приведены на рис. 5, где при режиме: напряжение «Высокое» (121 кВ), положение РПН «Рабочее» (12), коэффициент регулирующего эффекта нагрузки РКН «Отрицательный» (–0,5), мощность «Режим перегрузки» (45 МВт) – управляющий сигнал «Вниз» (–0,669) (рис. 5а). При режиме: напряжение «Высокое» (121 кВ), положение РПН «Рабочее» (12), коэффициент регулирующего эффекта нагрузки РКН «Положи-

тельный» (0,45), мощность «Режим перегрузки» (45 МВт) – управляющий сигнал «Вверх» (0,669) (рис. 5б); при режиме: напряжение «Высокое» (121 кВ), положение РПН «Рабочее» (12), коэффициент регулирующего эффекта нагрузки РКН «Положительный» (0,45), мощность «Нормальный» (35 МВт) – управляющий сигнал «Стоим» (–0,0357) (рис. 5в).

Затем система АСУПП была апробирована на математической модели части энергосистемы в программном комплексе Matlab с тем же трансформатором АДЦТГН-63000/220/110/10. В вынужденном режиме, при мощности 45 МВт, напряжении 109 кВ, отпайка РПН занимает положение 19, а РКН «Положительный» (0,8), был получен сигнал РПН «Вниз» – дальнейшее увеличение напряжения. Переток активной мощности снизился на 0,8 МВт. После этого автоматически система АСУПП выработала еще 6 переключений с корректировкой коэффициента регулирующего эффекта нагрузки до РПН 12. Напряжение при этом повысилось до 117,6 кВ, переток мощности вошел в значение «Нормальный» (37,1 МВт). Управляющий сигнал не изменял своего значения до тех пор, пока не был снижен переток мощности ниже номинала.

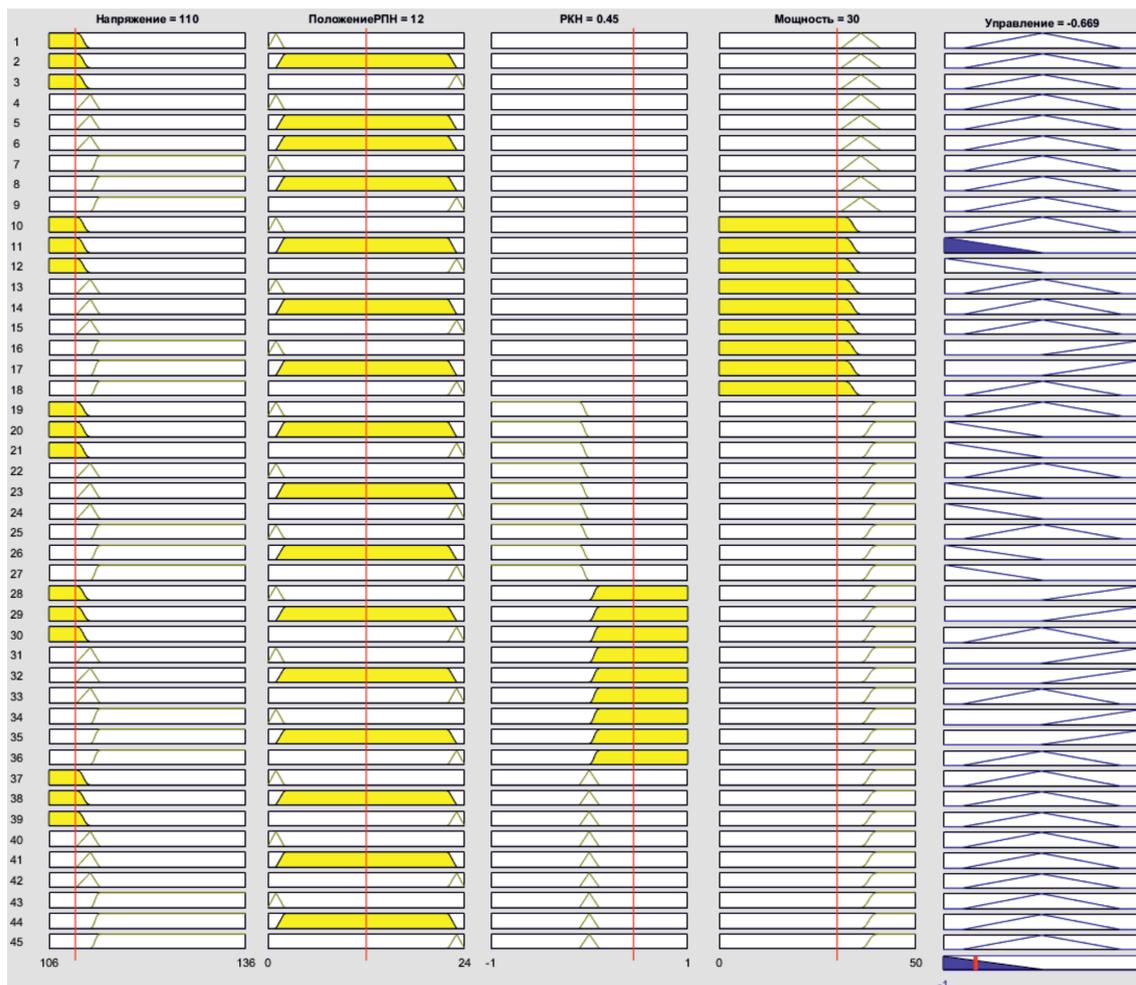


Рис. 4. Работа нечеткого регулятора

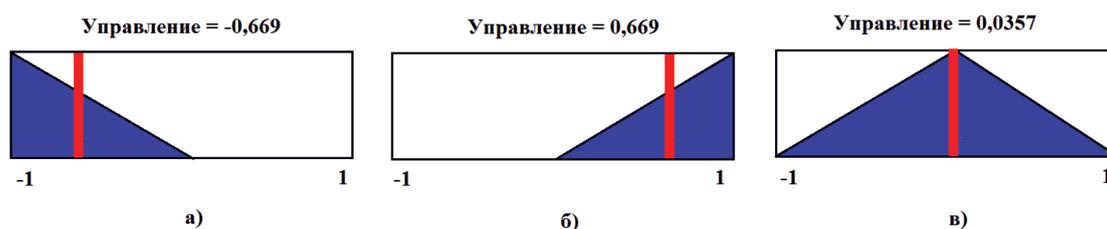


Рис. 5. Иллюстрация сигнала управления для характерных режимов

### Выводы

Разработанная система автоматического управления перетоком активной мощности в вынужденном режиме на базе нечеткой логики и пассивного мониторинга статической характеристики нагрузки работает логически верно. Система способна автоматически снижать переток активной мощности до 7% в режиме перегрузки только за счет изменения напряжения с помощью АРПН, что дает возможность более эффективно

обеспечивать необходимую пропускную способность линии и показывает целесообразность ее использования.

### Список литературы

1. Петров В.В. Разработка методик управления транспортом электроэнергии в пределах заданной пропускной способности сетевых элементов: дис ... канд. техн. наук. Красноярск, 2019. 157 с.
2. Булов В.В., Чемборисова Н.Ш. Влияние статических характеристик современных видов нагрузки на режимы работы электрических сетей // Вестник Московского энергетического института. 2021. № 2. С. 20–28.

3. Babaei, A., Ziomek, W., Gole, A.M. Transient characteristics of on-load tap changers during change-over operation. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 197. P. 107296. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.10729.

4. Савина Н.В., Лабeko В.О. Автоматическое регулирование напряжения силовых трансформаторов и автотрансформаторов, как средство повышения эффективного функционирования электрических сетей // *Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов IX Международной научно-технической конференции*. 2019. С. 102–05.

5. Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2 (47). С. 19–25.

6. Алябьев В.Н., Перегородина Е.Д. Разработка алгоритма по уменьшению уровня отклонения напряжения в распределительной сети // *Энергетическая безопасность:*

сборник научных статей III Международного конгресса. Курск, 2020. С. 116–120.

7. Петров В.В., Баратова К.В., Полищук В.И. Способ обеспечения допустимого сальдо-перетока мощности в контролируемом сечении // *Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Омск, 2020. С. 70–74.

8. Полищук В.И., Панкратов А.В., Кондрашов М.А., Шувалова А.А. Автоматизированная идентификация статических характеристик нагрузки по напряжению «Идентификатор СХН» // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661878, дата регистрации 16.07.2021, Бюл. № 7*.

9. Панкратов А.В., Жуйков А.К., Шувалова А.А., Полищук В.И. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2 (51). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11.