

УДК 621.317.727

## О НОРМАЛИЗАЦИИ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ 0,38 КВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛЬТОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Колик В.Р., Драко\*М.А., Короткевич А.М., Вольфсон Д.С.

### Аннотация

Проанализированы причины и следствие понижения уровней напряжения у потребителей, получающих электроснабжение по протяженным воздушным линиям электропередачи 0,38 кВ.

Предложена установка в расчетных точках сети 0,38 кВ нетипового вольторегулирующего устройства, для которого разработана расчетная аналитическая модель и описан принцип действия.

Приведено сравнение функциональных возможностей и характеристик предлагаемого вольторегулирующего устройства с аналогами.

**Ключевые слова:** напряжение, потребитель, качество электроэнергии, вольторегулирующее устройство.

### Введение

Особенностью распределительных сетей напряжением 0,38 кВ является то, что они непосредственно снабжают электрической энергией большую часть потребителей, в том числе практически всех потребителей коммунально-бытового сектора, которые, за редким исключением, не обладают средствами регулирования напряжения на требуемом уровне, например, трансформаторами с регулированием под нагрузкой (РПН) [1] или стабилизаторами напряжения.

С изменением во времени электрических нагрузок потребителей (величин и структуры), уровней напряжений в центрах питания и других влияющих факторов изменяются значения падения напряжения в элементах сети, а следовательно, и уровни напряжения в узлах схемы сети [2]. В результате возникают ситуации, когда установившееся отклонение напряжения у потребителя не соответствуют нормам [3].

При переходе на рыночные отношения серьезность данной проблемы усугубляется, т.к. требования к показателям качества электроэнергии определяются договорами на пользование электрической энергией между электроснабжающей организацией и потребителем – с учетом необходимости выполнения норм стандарта напряжения на выводах электроприемников [4].

### 1. Анализ проблемы

Рассмотрим главные причины недопустимо низких уровней напряжения в сетях 0,38 кВ и, соответственно, в точках подключения к ним потребителей.

---

\* РУП “Белэнергосетьпроект”, Минск, Республика Беларусь, drako.mikhail@mail.ru

Известно, что вся цепь электропитания от шин 10 кВ подстанций 110-35/10 кВ до концов ВЛ 0,38 кВ является оперативно нерегулируемой по напряжению. Кроме этого, что при проектировании ВЛ 0,38 кВ был неверно спрогнозирован в меньшую сторону рост электрических нагрузок. Вкупе с вынужденной экономией проводникового металла при проектировании ВЛ это привело к тому, что в настоящее время достаточно широко представлены т.н. «слабые линии» 0,38 кВ, где либо постоянно, либо в определенных нагрузочных режимах, на части линии уровни фазного и линейного напряжения находятся ниже предельно допустимого минимального уровня.

Для новых и реконструируемых ВЛ 0,38 кВ сельскохозяйственного назначения при выборе сечений проводов и жил кабелей стандартом [5] регламентируется принимать электрические нагрузки на перспективу 10 лет. Однако для находящихся в эксплуатации ВЛ 0,38 кВ в Белорусской энергосистеме и в энергосистемах сопредельных стран рассматриваемая проблема стоит остро.

Несмотря на общую для стран СНГ тенденцию к автоматизации распределительных электрических сетей 0,38-10 кВ, проблемы сетей 0,38 кВ, как правило, в проектах автоматизации не рассматриваются и не решаются.

В Республике Беларусь в связи с предстоящим вводом БелАЭС Отраслевой программой развития электроэнергетики на 2016–2020 годы предусмотрено увеличение объемов электропотребления за счет использования электроэнергии для производства тепловой энергии и стимулирования ее применения населением для отопления и горячего водоснабжения [6]. Указанное обстоятельство несомненно приведет к дополнительной нагрузке ВЛ 0,38 кВ и, следовательно, к дальнейшему снижению уровней напряжения у потребителей, в первую очередь у более удаленных от центров питания.

Решить указанную проблему полностью можно было бы за счет реконструкции и нового строительства распределительных сетей 0,38 кВ с возможным разукрупнением трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ. Однако данное мероприятие требует больших капитальных вложений.

Повышение напряжения ВЛ 0,38 кВ путем изменения положений переключателя числа витков без возбуждения (ПБВ) трансформаторов 10/0,4 кВ влечет за собой риски недопустимого повышения уровней напряжения в начале ВЛ 0,38 кВ при внезапном повышении уровней напряжения в сетях 10 кВ. Поэтому данный способ может применяться лишь в ограниченном числе случаев.

На самом деле проблема решается только в том случае, если напряжение значительно падает в трансформаторе из-за его перегрузки. На практике же это редкий случай, в подавляющем большинстве случаев проблемой является, как указано выше, «слабая линия». Для подтверждения данного тезиса рассмотрим условный расчетный пример «слабой линии» Л1 (рис. 1). Нагрузка подключена в двух точках: 1 – середина линии, 2 – конец линии.

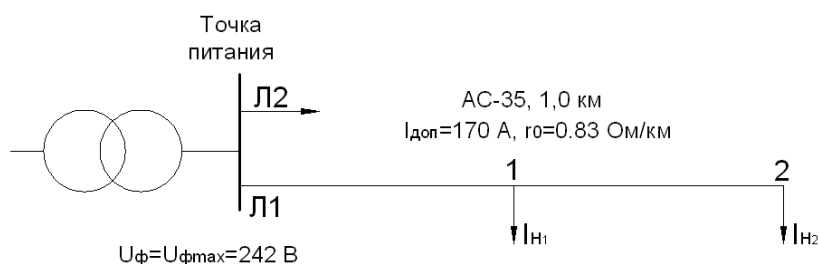


Рис. 1 – Условная схема слабой линии.

Для показательности примем в точке питания уровень фазного напряжения неизменно равным верхнему предельно допустимому значению 242 В (в Белорусской энергосистеме при переходе на ГОСТ 29322-2014 и ГОСТ 32144-2013 сохранилось номинальное напряжение 220/380 В). В таблице 1 приведены расчетные уровни напряжения в точках 1 и 2 для разных токовых нагрузок. То же показано на графике (рис. 2).

Таблица 1 – Уровни напряжения в слабой линии при разных токовых нагрузках

Токовые нагрузки, А		Уровни фазного напряжения, В		
Точка 1	Точка 2	Точка питания	Точка 1	Точка 2
30	30	242	217,1	204,7
40	40	242	208,8	192,2
50	50	242	200,5	179,8
60	60	242	192,2	167,3
70	70	242	183,9	154,9

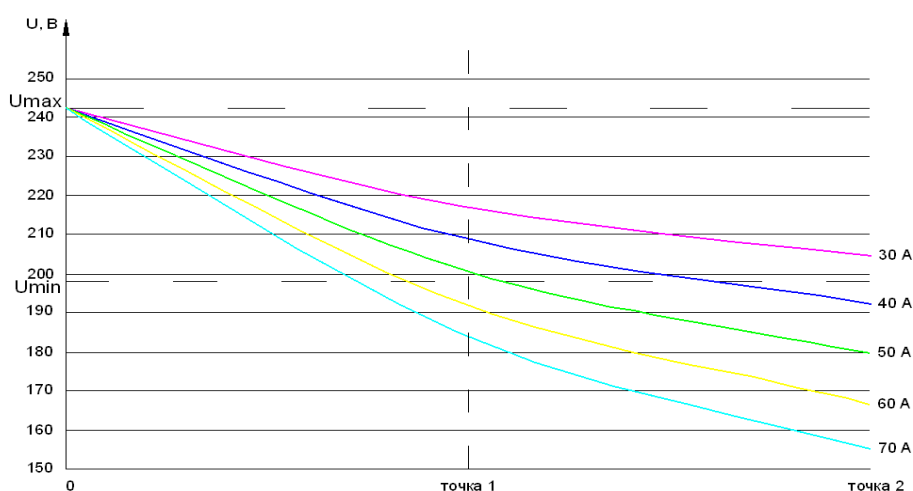


Рис. 2 – Уровни напряжения в слабой линии при разных токовых нагрузках.

Как видно из таблицы 1 и рис. 2, даже при гипотетическом условии поддержания в точке питания «слабой линии» наибольшего допустимого напряжения, начиная с некоторых уровней токовой нагрузки, часть линии всегда будет иметь ненадлежащий низкий уровень напряжения, и с ростом нагрузки эта часть линии будет увеличиваться.

## 2. Предлагаемое решение

В то же время достаточно эффективным методом является применение вольторегулирующих устройств (ВРУСТ), устанавливаемых в расщепки линий 0,38 кВ и осуществляющих регулирование напряжения в

темпе процесса.

ВРУСТ непосредственно ориентирован на применение на находящихся в эксплуатации «слабых» ВЛ 0,38 кВ, где имеются проблемы, связанные с недопустимо низкими уровнями напряжения. Применение ВРУСТ позволяет обеспечить надлежащие уровни напряжения для подключенных потребителей - до реконструкции ВЛ или окончания ее срока службы (после чего ВРУСТ перемещается в другое проблемное место). С учетом того, что стоимость ВРУСТ значительно меньше стоимости реконструкции ВЛ (от 4 до 9 раз), его применение является экономически обоснованным и эффективным на «слабых линиях» 0,38 кВ.

При необходимости электроснабжения отдельных потребителей или их групп, удаленных (от 700 м и более) от точки питания в проектной практике учитывается возможность эффективного применения ВРУСТ на проектируемых или вводимых в эксплуатацию ВЛ 0,38 кВ. В этом случае при предпроектной проработке в рамках сравнительного анализа вариантов проектных решений рассматривается вариант с применением ВРУСТ. В определенных случаях вариант с применением ВРУСТ может оказаться более выгодным – если экономия от снижения затрат на провода большего сечения и дополнительные опоры значительно превысит стоимость ВРУСТ.

Главной функцией ВРУСТ является независимое пофазное регулирование напряжения в ВЛ 0,38 кВ с целью недопущения выхода напряжения за пределы заданного диапазона – как в меньшую, так и большую сторону. (Последнее – очень важно, так как в силу преобладания однофазной нагрузки в ряде случаев для разных фаз требуется разное управляющее воздействие по регулированию напряжения). В зависимости от входного напряжения, каждая фаза работает в одном из трех режимов: «вольтодобавка», «вольтопонижение», «транзит» (выходное напряжение равно входному).

ВРУСТ характеризуется номинальной проходной мощностью, которая выбирается исходя из ожидаемого максимума полной проходной мощности в месте установки ВРУСТ с учетом перспективного роста нагрузки.

### 3. Принцип регулирования напряжения с применением ВРУСТ

Рассмотрим установку ВРУСТ на примере одной фазы воздушной трехфазной линии 0,38 кВ (рис. 3). С целью упрощения принимаем следующие допущения: линия без отпаек; сечение провода по всей длине – 25 мм<sup>2</sup>; во всех узлах нагрузки имеют одинаковый коэффициент мощности.

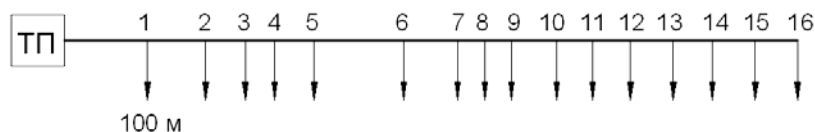


Рис. 3 – Условная схема линии с распределенной нагрузкой.

Предположим, что уровень фазного напряжения в центре питания  $U_0=230$  В, значения фазных токовых нагрузок в узлах сведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения фазных токовых нагрузок потребителей

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I_n, A$	7	2	6	2	3	2	3	4	3	4	3	5	2	2	2	1

Результаты расчета уровней фазного напряжения в узлах представлены ниже в виде эпюры изменения напряжения вдоль линии (рис. 4).

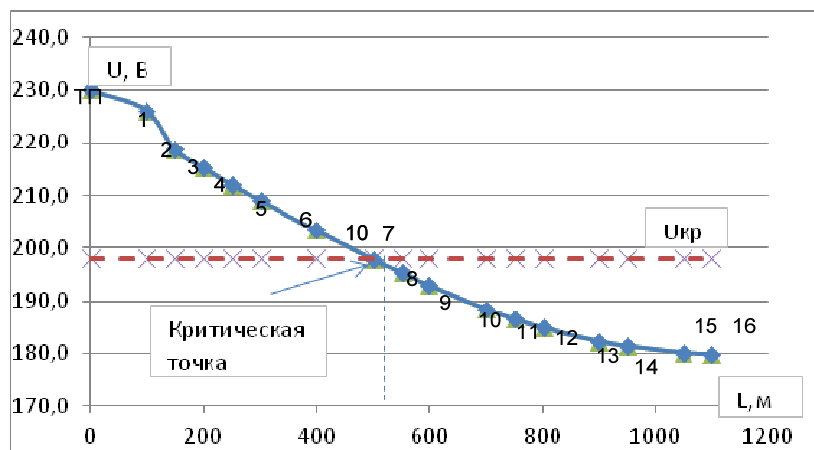


Рис. 4 – Распределение значений фазного напряжения в узлах в исходном режиме.

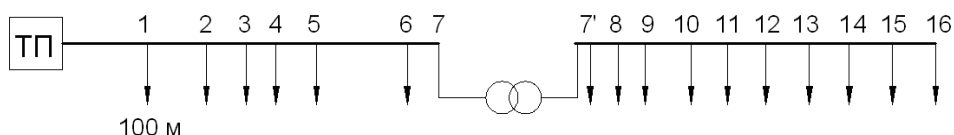


Рис. 5 – Условная схема сети с установкой ВРУСТ в узле 7.

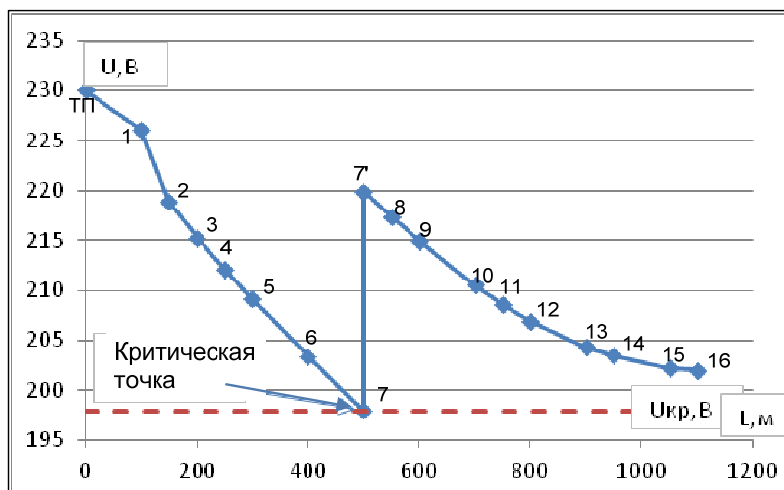


Рис. 6 – Ожидаемое распределение значений фазного напряжения в узлах при установке ВРУСТ.

Как видно из рис. 4, в данном режиме часть линии правее критической точки вместе с присоединенными к ней потребителями 7-16 работают с напряжением ниже уровня предельно допустимого значения, в самой удаленной от центра питания точке 16 ожидаемое фазное напряжение составит 180 В.

Включение вольтодобавочного устройства с повышением напряжения на 10% в рассечку линии в критической точке позволяет нормализовать уровни напряжения на всем протяжении рассматриваемой линии.

На рис. 5 приведена условная схема сети с установкой в узле 7 ВРУСТ, а на рис. 6 – ожидаемое распределение значений фазного напряжения в узлах при установке ВРУСТ.

#### 4. Рекомендации по выбору места установки и параметров ВРУСТ

Предлагается следующий алгоритм выбора оптимального месторасположения и номинального тока ВРУСТ:

1. Производятся замеры фазных напряжений в разных точках “проблемной” ВЛ 0,38 кВ в режимах максимальной нагрузки.

2. Если имеет место сильная несимметрия токов нагрузки, то проводится корректирующая перефазировка нагрузок с целью их выравнивания по фазам. П.1 повторяется.

3. Определяется критическая точка – ближайшее к точке питания место на линии (пролет), где по замерам фазное напряжение опускалось ниже нижней границы предельно допустимого отклонения напряжения [3].

4. Если критическая точка находится в начале линии, то ВРУСТ следует устанавливать на ТП 10/0,38 кВ – в каждой отдельной ВЛ 0,38 кВ или на вводе(-ах) низшего напряжения трансформаторов. В остальных случаях выбирается смежная опора, имеющая необходимую для установки ВРУСТ механическую прочность и повторный заземлитель (не выше 30 Ом). При отсутствии повторного заземлителя его необходимо смонтировать.

5. Номинальная мощность ВРУСТ выбирается исходя из оценок величин перспективных максимальных фазных токов нагрузки в точке установки ВРУСТ. С учетом вероятности роста нагрузки производителем рекомендуется предусмотреть запас по мощности не менее 30%.

#### 5. Принцип действия ВРУСТ

Принципиальная схема работы ВРУСТ показана на рис.7.

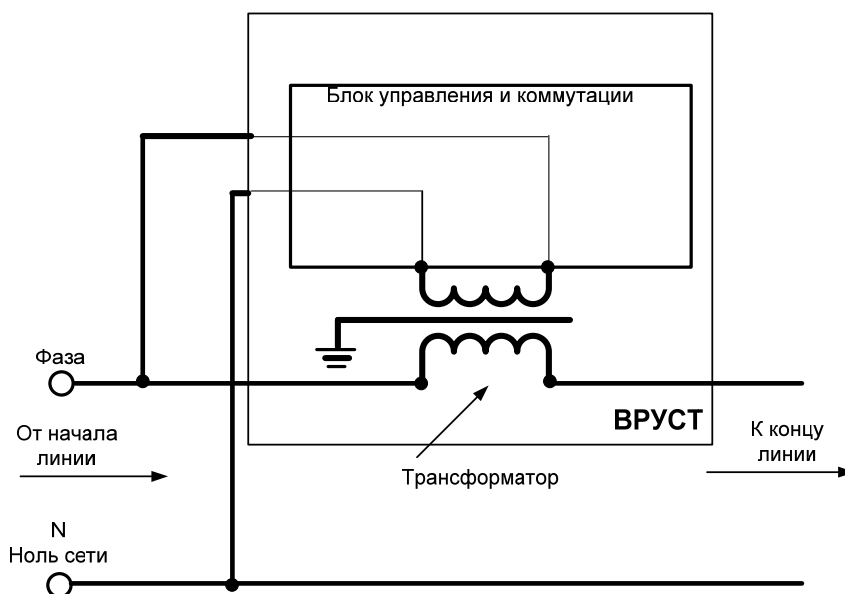


Рис. 7 – Принципиальная схема работы ВРУСТ.

В составе ВРУСТ используется двухобмоточный трансформатор заводского изготовления соответствующей мощности и с определенным коэффициентом трансформации в зависимости от шага регулирования. Одна из обмоток трансформатора (силовая) включена постоянно последовательно с нагрузкой линии. Вторая обмотка (регулирующая) коммутируется блоком управления и может принимать три положения: согласное включение с основной обмоткой (режим повышения напряжения), встречное включение с основной обмоткой (режим понижения напряжения) и отключение регулировочной обмотки (режим «транзит», или «bypasse», когда не происходит ни повышения, ни понижения напряжения).

## **6. Показатели технической эффективности применения ВРУСТ**

С целью всесторонней проверки и испытания ВРУСТ летом 2013-го года проводились длительные испытания ВРУСТ в Гомельском сельском РЭС. Надо отметить, что сроки испытания совпали с периодом грозовой активности. Были выделены два места установки ВРУСТ. До и после ВРУСТ подключались сертифицированные анализаторы качества электроэнергии, которые измеряли и записывали режимные показатели и показатели качества электроэнергии в реальном режиме с высокой дискретизацией измерений.

Испытания продемонстрировали надежную работу ВРУСТ и что его применение обеспечивает надлежащие уровни напряжения в ВЛ 0,38 кВ и в точках подключения к ним потребителей.

Побочным, но не менее важным эффектом, достигаемым благодаря независимому пофазному регулированию, является симметрирование трехфазной системы напряжений.

## **7. Сравнение с аналогами**

Аналогами ВРУСТ следует считать устройства или/и мероприятия, обеспечивающие нормализацию уровней напряжения в ВЛ 0,38 кВ.

Следует оговориться о нецелесообразности применения для регулирования напряжения статической компенсации реактивной мощности (КРМ) с использованием автоматизированных конденсаторных установок (АКУ) в ВЛ 0,38 кВ, питающих потребителей коммунально-бытового сектора. Во-первых, ввиду малой доли реактивной составляющей нагрузки, подключенной к ВЛ 0,38 кВ (главным образом, асинхронных электродвигателей), применение АКУ для повышения напряжения обусловит большие паразитные потоки реактивной мощности от места установки АКУ к началу линии и, как следствие, высокие дополнительные потери активной мощности и энергии. Во-вторых, потребуются существенные дополнительные затраты для защиты АКУ от высших гармоник (фильтрами и дросселями). В-третьих, в ряде режимов, как правило, есть необходимость не повышения, а понижения напряжения по одной или нескольким фазам, и эта задача с применением АКУ не решается в принципе.

В данном случае аналогами являются: реконструкция линии или применение устройств, аналогичных ВРУСТ. Как показал опыт, общая стоимость реконструкции в 4-9 раз превышает стоимость ВРУСТ.

При проведении сравнительного анализа ВРУСТ с бустер-трансформаторов финского и российского производства сделаны следующие выводы:

- ВРУСТ является уникальным в части независимого пофазного регулирования;
- масса ВРУСТ в 7-10 раз ниже. В результате цена ВРУСТ в два раза ниже (5-7 тыс. USD), чем у указанных аналогов;
- благодаря низким массогабаритным показателям (55-80 кг), для монтажа и демонтажа достаточно штатных вышек;
- ВРУСТ имеет возможность оснащения устройствами для дистанционного съема сигналов и электроизмерений с последующей интеграцией в измерительно-информационные системы и системы диспетчерского управления;
- имеются различные модификации ВРУСТ: одноступенчатая (с возможным шагом регулирования 12, 18, 24 или 36 В) и двухступенчатая.

## 8. Показатели экономической эффективности применения ВРУСТ

Величины электропотребления разных видов электроприемников зависят соответствующим образом от уровней напряжения питания. Это необходимо учитывать в расчетах экономической эффективности.

Зависимость потребляемой активной мощности от напряжения для смешанной нагрузки, присоединенной к узлу, могут быть представлены в следующем виде [2]:

$$P(U) = P_{iii} (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 U_* + \dot{a}_2 U_*^2), \quad (1)$$

где  $U_* = U / U_{ном}$  – относительное значение напряжения в узле;  $U$  – текущее расчетное значение напряжения в узле;  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты, причем  $a_0 + a_1 + a_2 = 0$ .

Значение коэффициентов для сельскохозяйственных районов [2]:  
 $a_0 = -0,2, a_1 = 1,2, a_2 = 0$ .

Выражение (1) для однофазных электроприемников примет вид:

$$P(U) = P_{iii} \left( -0,2 + 1,2 \frac{U}{U_{iii}} \right). \quad (2)$$

Зададимся номинальными мощностями электроприемника на уровне 1 о.е., и рассмотрим изменение электропотребления в зависимости от текущего действительного значения напряжения в узле от 180 В до 240 В.

$$P(U) = (0,78 \div 1,11)P.$$

Таким образом, применение ВРУСТ в сетях 0,38 кВ обеспечивает для электрических сетей эффект за счет увеличения товарной продукции (полезного отпуска электроэнергии). В ряде случаев, когда ранее имело место значительное снижение напряжения по отношению к нижней допустимой границе, следует также ожидать некоторого увеличения полезного отпуска электроэнергии за счет подключения и работы дополнительного числа электроприемников, которые не работали при сильно заниженном напряжении.



Другая составляющая экономического эффекта энергосистемы обусловлена исключением в результате нормализации уровней напряжения штрафов и выплат по судебным искам за ущерб от ненадлежащего качества электроэнергии. Следует отметить, что с развитием цивилизованных рыночных отношений в электроэнергетике и неизбежным ужесточением ответственности за качество поставляемой электроэнергии эта доля экономического эффекта кардинально вырастает и в конечном счете превалировать.

### **Заключение**

Опыт применения ВРУСТ в электрических сетях 0,38 кВ Белорусской энергосистемы показал, что установка вольтодобавочного устройства в расчетной точке фазы ВЛ 0,38 кВ позволяет при минимальных затратах по сравнению с другими техническими вариантами, поддерживать нормальные уровни фазного напряжения в «слабых» линиях 0,38 кВ, в том числе в наиболее удаленных от центра питания точках подключения потребителей.

Все сказанное выше, включая технические решения, распространяется также и на электрические сети номинального напряжения 0,23/0,4 кВ.

### **Литература**

1. Фадеева Г.А., Федин В.Т. Проектирование распределительных электрических сетей: учебное пособие. Минск: Выш. шк., 2009, 365 с.
2. Жежеленко И.В., Короткевич М.А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях: учебное пособие. Минск: Выш. шк. 2012, 197 с.
3. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012, 351 с.
5. ТКП 385-2012 Нормы проектирования электрических сетей внешнего электроснабжения напряжением 0,4-10 кВ сельскохозяйственного назначения. Утвержден и введен в действие постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 19.04.2012 г. № 18. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 88 с.
6. Киселев К.А., Бузюма Л.И., Драко М.А. О необходимости скорейшей реконструкции трансформаторных подстанций 35-110 кВ, выполненных по схеме с отделителями и короткозамыкателями // Энергетическая стратегия, 2018, № 1, с. 20-22.
7. ГОСТ 29322-2014 Стандартные напряжения.