



ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/0,4 кВ С РАСШИРЕННЫМИ ПРЕДЕЛАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Фарраев А.И., Маклецов А.М., Максимов В.В., Куракина О.Е.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

viktor.maksimov.1968@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в обеспечении качественного электроснабжения потребителей на фоне увеличения количества технологических присоединений. Одним из важнейших показателей качественного электроснабжения является напряжение в электрических сетях. В статье рассматриваются проблемы регулирования напряжения в распределительных сетях (РС), что позволяет обеспечить требуемое качество электроэнергии, снизить потери электроэнергии и повысить пропускную способность линий электропередачи. ЦЕЛЬ. Разработка мероприятий по обеспечению качества электроэнергии с использованием различных методов регулирования напряжения. МЕТОДЫ исследования включают математическое моделирование линий электропередачи (ЛЭП) с учетом статических характеристик нагрузки, а также моделирование процессов в распределительных сетях с использованием пунктов автоматического регулирования напряжения (ПАРН) и трансформаторов 10/0,4 оснащенными устройствами переключения ответвлений обмоток высшего напряжения без возбуждения (ПБВ) с расширенным диапазоном регулирования напряжения до $\pm 10\%$. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследования демонстрируют целесообразность внедрения трансформаторов с расширенными пределами регулирования напряжения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенное исследование демонстрирует, что оба рассмотренных метода, а именно установка ПАРН и переход на трансформаторы с расширенным диапазоном ПБВ $\pm 10\%$ позволяют решить ключевую задачу: поддерживать качество электроэнергии в пределах требований во всех узлах протяженной распределительной сети.

Ключевые слова: напряжение; качество электроэнергии; регулирование напряжения; потери мощности; полезный отпуск; ПАРН; ПБВ; статические характеристики нагрузок; потери холостого хода; экономическая эффективность; математическое моделирование.

Для цитирования: Фарраев А.И., Маклецов А.М., Максимов В.В., Куракина О.Е. Оценка качества функционирования трансформаторов 6-10/0,4 кВ с расширенными пределами регулирования напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 54-69. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-54-69.

EXPANDING THE VOLTAGE CONTROL RANGE OF 6/0.4 kV POWER TRANSFORMERS

Farraev A.I., Makletsov A.M., Maksimov V.V., Kurakina O.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

viktor.maksimov.1968@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in ensuring high-quality electricity supply to consumers against the background of an increasing number of technological connections. One of the most important indicators of high-quality electricity supply is the voltage in electrical networks. The article considers the problems of voltage regulation in distribution networks (DN), which helps to ensure the required quality of electricity, reduce electricity losses and increase the capacity of power transmission lines. THE PURPOSE. Development of measures to ensure the quality of electricity using various methods of voltage regulation. METHODS of the study include mathematical modeling of power transmission lines (PL) taking into account the static

characteristics of the load, as well as modeling of processes in distribution networks using automatic voltage regulation points (AVRP) and 10/0.4 transformers equipped with tap-changer devices for high-voltage windings without excitation (PBB) with an extended voltage regulation range of up to $\pm 10\%$. RESULTS. The results of the study demonstrate the feasibility of introducing transformers with extended voltage regulation limits. CONCLUSION. The conducted study demonstrates that both of the considered methods, namely the installation of a PARN and the transition to transformers with an extended range of PBB of $\pm 10\%$, make it possible to solve a key problem: maintaining the quality of electricity within the requirements at all nodes of an extended distribution network.

Keywords: *voltage; power quality; voltage regulation; power losses; useful supply; PARN; PBB; static load characteristics; no-load losses; economic efficiency; mathematical modeling.*

For citation: Farraev A.I., Makletsov A.M., Maksimov V.V., Kurakina O.E. Expanding the voltage control range of 6/0.4 kV power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 54-69. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-54-69.

Введение (Introduction)

В связи с постоянным ростом спроса на электроэнергию и увеличения количества технологических присоединений проблема поддержания стабильного и качественного электроснабжения при минимальных потерях электроэнергии является критически важной и актуальной задачей. В современном мире стабильность и надежность энергоснабжения играют ключевую роль в функционировании различных отраслей жизни. Одним из центральных аспектов обеспечения этой стабильности является регулирование напряжения в электрических сетях.

Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях осуществляется в следующих целях: обеспечение требуемого качества электроэнергии; снижение потерь электроэнергии; повышение пропускной способности ЛЭП.

Для обеспечения качества электроэнергии в настоящее время широко используется регулирование напряжения с помощью ПАРН [1].

В настоящее время потери электроэнергии в электрических сетях достаточно высоки. Так, например, в 2025 г. потери электроэнергии в электрических сетях АО «Сетевая компания» РТ составили около 6,5% [2], поэтому актуален вопрос их снижения. Вопросам повышения эффективности функционирования электрических сетей за счет повышения их надежности и экономичности в настоящее время проводится значительное количество работ, например, [3-7].

Наряду с повышением пропускной способности ЛЭП с помощью увеличения сечения проводов в последнее время также находит применение ПАРН [8]. В этом случае ограничение пропускной способности определяется недопустимым, с точки зрения качества электроэнергии, падением напряжения в линии.

Регулирование напряжения ввиду наличия статических характеристик нагрузки влияет также на величину потребления электроэнергии (полезный отпуск электроэнергии с точки зрения электроснабжающих организаций) [9].

Самым распространенным способом регулирования напряжения является использование трансформаторов с использованием устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Однако трансформаторы с РПН серийно выпускаются для напряжений 35 кВ и выше, для напряжений 6-10 кВ такие трансформаторы изготавливаются по индивидуальным заказам [10] и в распределительных сетях не используются.

Особенно остро проблема регулирования напряжения встает на длинных участках сети 6-10 кВ, где длина линии (фидера) может быть несколько десятков километров. На отдаленных узлах при увеличении нагрузки, или в сетях с двухсторонним питанием в послеаварийном режиме работы возможны отклонения напряжения конечных потребителей более допустимого уровня, что требует необходимость модернизации сети, для регулирования напряжения [11-13].

Используемые в настоящее время устройства регулирования напряжения на трансформаторах 6-10/0,4 кВ (переключатели без возбуждения ПБВ) имеют диапазон регулирования напряжения $\pm 5\%$, что во многом определялось действующими до 2013 г. ГОСТ по качеству электроэнергии, которые регламентировали допустимые отклонения напряжения у потребителей также $\pm 5\%$. Новый ГОСТ 32144-2013 регламентирует

длительное отклонение напряжения в точке отпуска электроэнергии в пределах $\pm 10\%$, что допускает разность напряжений у ближайших и удаленных потребителей в сетях 0,4 кВ в пределах 20% от номинального. В таких условиях представляется необходимым рассмотреть целесообразность расширения пределов регулирования ПБВ трансформаторов 6-10/0,4 кВ также до $\pm 10\%$.

В данной статье проведены расчеты и рассмотрены способы регулирования напряжения для соблюдения показателей качества у конечных потребителей при различных нагрузках путем установки ПАРН, а также целесообразность внедрения трансформаторов 10/0,4 кВ, оснащенных устройствами ПБВ с диапазоном регулирования $\pm 10\%$ в целях исключения использования дорогостоящих ПРАН. Оценочными критериями при этом являлись показатели качества электроэнергии, передаваемая по питающим сетям мощность и ее потери.

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время для распределительных сетей 6-10 кВ наиболее распространенной схемой питания потребителей является схема с двумя источниками питания (рис. 1).

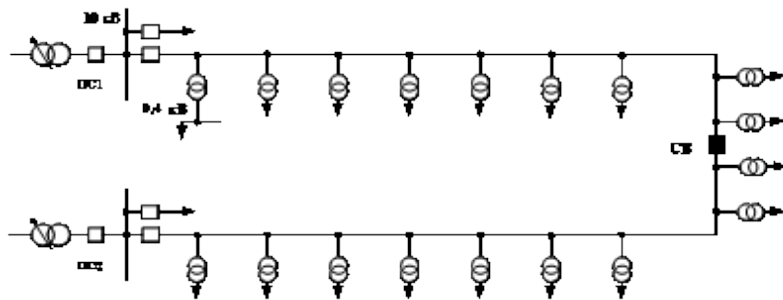


Рис. 1. Схема с двумя источниками питания *Fig. 1. Schematic with two power supplies*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В рассматриваемой схеме питание всех потребителей осуществляется от двух питающих подстанций – ПС1 и ПС2. Секционирующий выключатель СВ в нормальном режиме отключен. В случае ремонта одной из питающих подстанций СВ включается, а выключатель, питающий ВЛ со стороны ремонтируемой ПС, отключается. Рассматриваемый режим может оказаться недопустимым из-за значительного падения напряжения по всей длине ВЛ. Недопустимое падение напряжения может появиться и в схеме с одним источником питания при значительной (несколько десятков километров) длине ВЛ.

В данной работе рассматриваются два способа обеспечения необходимого качества электроэнергии по показателю длительного отклонения напряжения: использование ПАРН и расширение пределов регулирования ПБВ до $\pm 10\%$. Анализ и сравнение указанных способов производится с помощью математической модели распределительной сети, схема которой представлена на рисунке 2.

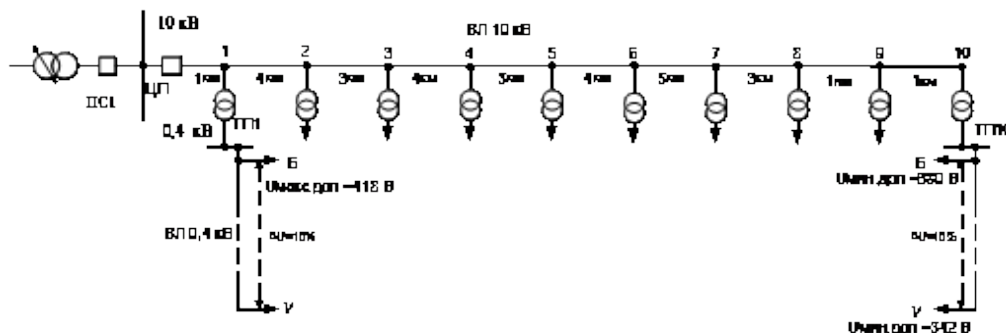


Рис. 2. Принципиальная схема моделируемой *Fig. 2. Schematic diagram of the simulated network*
 сети
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Согласно ГОСТ 32144-2013 номинальным фазным напряжением на стороне низшего напряжения ТП 10/0,4 кВ следует принимать величину 220 В (380 В – линейное). Согласно тому же ГОСТ допустимое отклонение напряжения в точке отпуска электроэнергии (в

рассматриваемом случае – на опоре ВЛ) составляет $\pm 10\%$ от номинального. Тогда максимально допустимое напряжение у ближайшего потребителя (Б) ТП1 $U_{\text{макс. доп}} = 380 * 1,1 = 418 \text{ В}$.

Минимально допустимое напряжения у удаленного потребителя (У) $U_{\text{мин. Доп.}} = 380 * 0,9 = 342 \text{ В}$. Падение напряжения на всей длине ВЛ 0,4 кВ принято равным 10%, что, в среднем, должно соответствовать правильно спроектированной линии длиной 600-800 м. Тогда минимально допустимое на шинах 0,4 кВ ТП равно $342/0,9 = 380 \text{ В}$

Математическая модель сети предусматривает учет статистических характеристик нагрузок по напряжению – зависимостей величины активных и реактивных нагрузок от напряжения, которые обычно описываются полиномами второй степени. [14]:

$$P(U) = P_{\text{НОМ}} * (a_0 + a_1 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right) + a_2 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^2), \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{\text{НОМ}} * (b_0 + b_1 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right) + b_2 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^2) \quad (2)$$

По ряду причин работы по определению статических характеристик нагрузок для типовых потребителей в условиях существенного изменения состава электроприемников практически только начинаются [15-17].

В [8] показано, что в пределах изменения напряжения $\pm 10\%$ от номинального статические характеристики можно линеаризовать и тогда выражения (1,2) принимают вид:

$$P(U) = P_{\text{НОМ}} * (1 + K_P * \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}}), \quad (3)$$

$$Q(U) = Q_{\text{НОМ}} * (1 + K_Q * \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}}), \quad (4)$$

где $\Delta U = U - U_{\text{НОМ}}$.

Для коммунально-бытовой нагрузки наблюдаются средние значения коэффициентов $K_P = 0,5$ и $K_Q = 2$ [5], которые и используются в предлагаемой математической модели распределительной сети.

При анализе длительных отклонений напряжений в точках отпуска электроэнергии необходимо рассмотреть режимы максимальных и минимальных нагрузок потребителей при неизменных уставках ПБВ трансформаторных подстанций. В первом из указанных режимов должна быть исключена вероятность недопустимого снижения напряжения у электрически наиболее удаленных потребителей, например, у удаленного потребителя «У» ТП 10. Во втором режиме должно быть исключено недопустимое повышение напряжений у близлежащих потребителей ТП. Выбор уровня напряжения в центре питания (ЦП) и ответвлений ПБВ всех ТП (рис. 2) необходимо производить для каждой конкретной сети с использованием данных измерений параметров режима при максимальных и минимальных нагрузках. В данной работе необходимые соотношения параметров режимов для максимальной и минимальной нагрузки в математической модели использовались графики нагрузок характерных потребителей. На рисунке 3 представлены суточные графики нагрузок активной (P) и реактивной (Q) нагрузок ВЛ 0,4 кВ в сельской местности полученные на действующей ТП прибором для измерения показателей качества электроэнергии RESURS UF. Результаты аналогичных измерений для многоквартирного жилого дома представлены на рисунке 4.



Рис. 3. Суточный график нагрузок ВЛ 0,4 кВ

Fig. 3. Daily load schedule for 0.4 kV overhead power lines

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

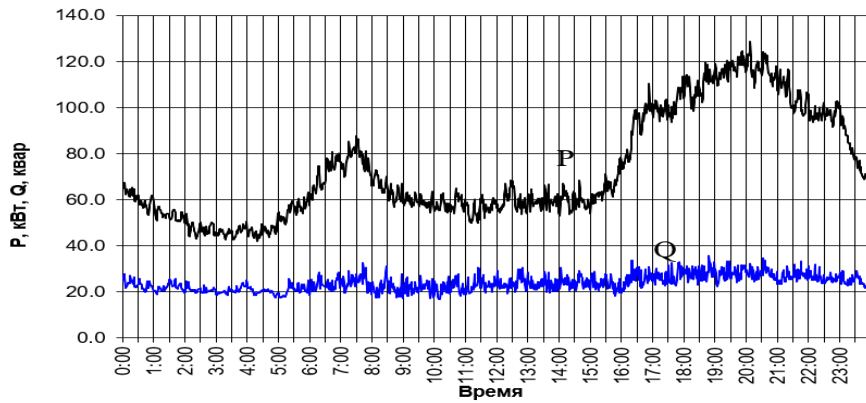


Рис. 4. Суточный график нагрузок Fig. 4. Daily load schedule of an apartment building многоквартирного жилого дома

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ отношений R_{\min}/R_{\max} и Q/P представленных графиков коммунально-бытовых нагрузок позволяет принять среднее соотношение минимальной нагрузки к максимальной равным 0,4. Для режима максимальных нагрузок $\text{tg } \varphi = Q/P$ был принят равным 0,1, а для режима минимальных – 0,2.

Для ВЛ 10 кВ нагрузкам узлов являются ВЛ 0,4 кВ с распределенными вдоль их длины потребителями. Для оценки статической характеристики такой нагрузки использовалась математическая модель ВЛ 0,4 кВ с равномерно распределенными вдоль ее длины нагрузками (рис. 5).

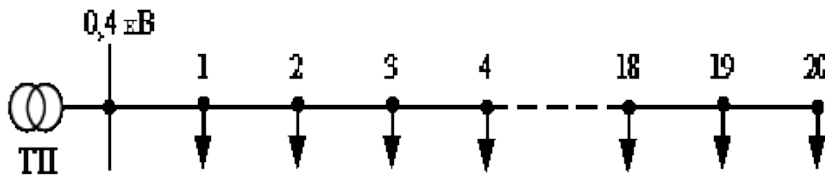


Рис. 5. Принципиальная схема радиальной ВЛ Fig. 5. Schematic diagram of a 0.4 kV radial overhead power line with 20 load nodes

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Математическая модель ВЛ основана на методе обратных и прямых итераций, который целесообразен для расчета режимов радиальных сетей [18-20]. При этом в качестве исходных данных используются нагрузки узлов, напряжение в начале ВЛ и ее параметры. При расчете режима сети учитывались как продольные, так и поперечные составляющие падения напряжений.

Обратный ход:

Принимается напряжение во всех узлах равным номинальному. Расчет начинается с конца ВЛ. Ток на последнем, i -ом участке ВЛ определяется по формуле:

$$I_i = \frac{\sqrt{(P_i^2 + Q_i^2)}}{\sqrt{3}U_H} \quad (5)$$

Потери мощности на i -ом участке ВЛ:

$$\Delta P_i = I_i^2 R_i, \quad \Delta Q_i = I_i^2 X_i \quad (6)$$

Мощность в голове i -го участка:

$$P_{i_{гв}} = P_i + \Delta P_i, \quad Q_{i_{гв}} = Q_i + \Delta Q_i \quad (7)$$

Мощности в конце $i-1$ го участка ВЛ

$$P_{(i-1)_{кв}} = P_{i_{гв}} + P_{i-1}, \quad Q_{(i-1)_{кв}} = Q_{i_{гв}} + Q_{i-1} \quad (8)$$

В результате первого этапа определяются потоки мощности на всех участках ВЛ и потери мощности на этих участках.

Прямой ход:

По известным потокам мощности определяются падения напряжения на участках ВЛ и напряжения в узлах. Расчет начинают с первого участка.

Ток первого участка:

$$I_1 = \frac{\sqrt{(P_{1н\text{у}}^2 + Q_{1н\text{у}}^2)}}{U_0} \quad (9)$$

Активная составляющая падения напряжения на первом участке ВЛ:

$$U_{a1} = \frac{P_{1н\text{у}} \cdot R_1}{U_0} + \frac{Q_{1н\text{у}} \cdot X_1}{U_0} \quad (10)$$

Реактивная составляющая падения напряжения на первом участке ВЛ:

$$\Delta U_{p1} = \frac{P_{1н\text{у}} \cdot X_1}{U_0} - \frac{Q_{1н\text{у}} \cdot R_1}{U_0} \quad (11)$$

Активная и реактивные составляющие напряжения в узле 1:

$$U_{1a} = U_{0a} - \Delta U_{a1}, \quad U_{1p} = U_{0p} - \Delta U_{p1} \quad (12)$$

Аналогичным образом рассчитываются напряжения всех узлов. При следующих итерациях при перерасчете нагрузок в зависимости от напряжения в формулах статических характеристик нагрузок (4-5) необходимо вместо $U_{ном}$ использовать напряжения узлов, полученные в результате расчетов. Расчет носит итерационный характер, причем опыт расчетов показал, что достаточная точность достигается после 5-7 итераций. Результаты расчета для режима максимальных нагрузок представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета режима максимальной нагрузки
Results of calculation of maximum load mode

Номер узла	Длина участка, м	Задаваемая нагрузка узла		Мощность в начале участка		Потери мощности на участке		I уз, А	U уз, В	Мощность в конце участка		Нагрузка с уч. ст. характеристик		
		P уз, кВт	Q уз, кВАр	P нач	Q нач	dP, кВт	dQ, кВАр			PK	Qk	Uном	P уз ст.	Quz. стат.
0														
1	40	1,8	0,36	41,002	9,598	0,727	0,363	168,503	245,221	40,275	9,234	220	1,903	0,443
2	40	1,8	0,36	38,372	8,792	0,660	0,330	160,586	240,680	37,712	8,462		1,885	0,428
3	40	1,8	0,36	35,827	8,034	0,596	0,298	152,598	236,378	35,231	7,736		1,867	0,414
4	40	1,8	0,36	33,364	7,322	0,535	0,267	144,541	232,315	32,830	7,055		1,850	0,400
5	40	1,8	0,36	30,979	6,655	0,476	0,238	136,417	228,493	30,503	6,416		1,835	0,388
6	40	1,8	0,36	28,668	6,029	0,421	0,210	128,228	224,912	28,247	5,818		1,820	0,376
7	40	1,8	0,36	26,427	5,442	0,368	0,184	119,977	221,573	26,058	5,258		1,806	0,365
8	40	1,8	0,36	24,252	4,893	0,319	0,160	111,666	218,476	23,933	4,733		1,794	0,355
9	40	1,8	0,36	22,139	4,378	0,273	0,137	103,289	215,620	21,866	4,241		1,782	0,346
10	40	1,8	0,36	20,084	3,896	0,230	0,115	94,880	213,007	19,853	3,781		1,771	0,337
11	40	1,8	0,36	18,082	3,443	0,191	0,096	86,412	210,634	17,891	3,348		1,762	0,329
12	40	1,8	0,36	16,129	3,019	0,155	0,078	77,899	208,503	15,974	2,941		1,753	0,322
13	40	1,8	0,36	14,221	2,618	0,123	0,062	69,346	206,611	14,098	2,557		1,745	0,316
14	40	1,8	0,36	12,352	2,241	0,095	0,047	60,757	204,959	12,258	2,194		1,738	0,311
15	40	1,8	0,36	10,519	1,883	0,070	0,035	52,136	203,545	10,450	1,848		1,733	0,306
16	40	1,8	0,36	8,717	1,542	0,048	0,024	43,488	202,369	8,669	1,518		1,728	0,302
17	40	1,8	0,36	6,941	1,215	0,031	0,016	34,818	201,430	6,910	1,200		1,724	0,299
18	40	1,8	0,36	5,186	0,901	0,017	0,009	26,129	200,727	5,168	0,892		1,721	0,297
19	40	1,8	0,36	3,447	0,595	0,008	0,004	17,427	200,258	3,439	0,591		1,719	0,295
20	40	1,8	0,36	1,720	0,296	0,002	0,001	8,716	200,025	1,718	0,295		1,718	0,295

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

График изменения фазных напряжений вдоль ВЛ представлен на рисунке 6.

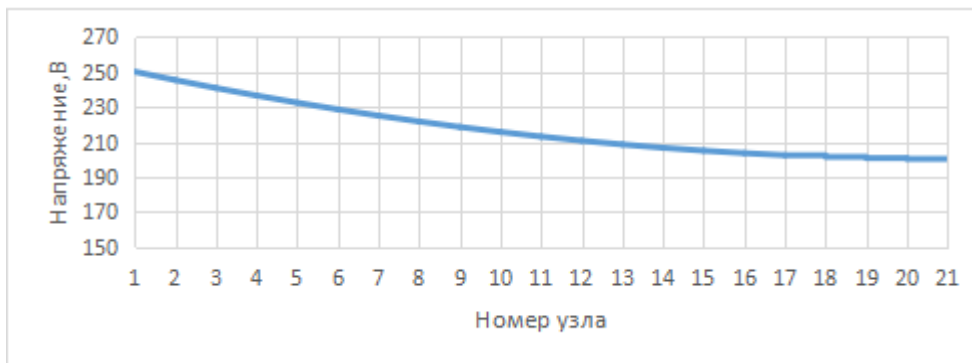


Рис. 6. Изменение напряжения вдоль ВЛ

Fig. 6. Voltage change along the overhead power line

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Для оценки влияния падения напряжения на ВЛ на ее статическую характеристику, как нагрузки, была проведена серия расчетов для случаев сосредоточенной нагрузки в начале ЛЭП и равномерно распределенной этой нагрузки вдоль длины линии. Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

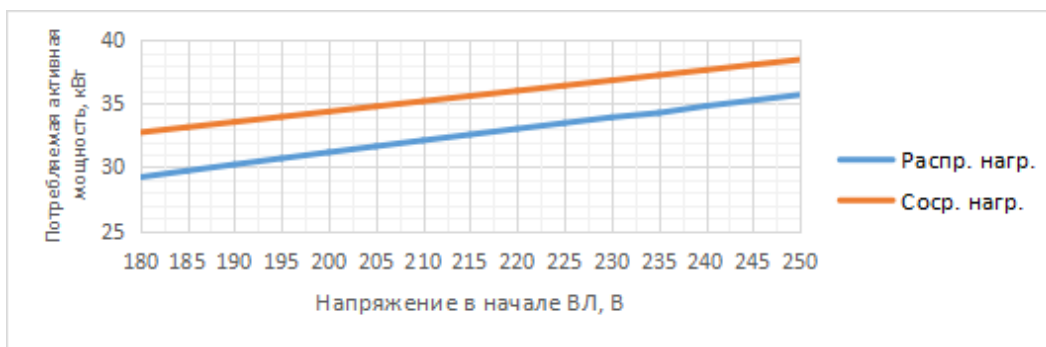


Рис. 7. Статические характеристики нагрузки ВЛ Fig. 7. Static characteristics of the overhead power line load

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 7 статическая характеристика реальной ВЛ с распределенной нагрузкой при всех напряжениях потребляет приблизительно на 10% меньшую мощность, чем ВЛ с сосредоточенной в ее начале нагрузкой. Поэтому для расчета режимов сети, представленной на рисунке 2, в данной работе предлагается считать все нагрузки сосредоточенными на шинах 0,4 кВ ТП и уменьшенными на 10%. Тогда выражения (3-4) примут вид:

$$P(U) = P_{ном} \left(1 + K_P \frac{\Delta U}{U_{ном}} \right) * 0,9 \quad (13)$$

$$Q(U) = Q_{ном} \left(1 + K_Q \frac{\Delta U}{U_{ном}} \right) * 0,9 \quad (14)$$

Приведенные статические характеристики используются в данной работе при расчетах режимов сети 10 кВ. Анализ линейных зависимостей (рис. 7) также показывает, что при принятых допущениях, на каждый 1 В увеличения напряжения нагрузка ВЛ увеличивается на 186 Вт, и это тоже учитывается в математической модели сети 10 кВ.

При расчетах режимов используются регулировочные ответвления ПБВ, округленные характеристики которых представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Table 2

Характеристики ПБВ с пределами регулирования напряжения $\pm 5\%$ $U_{ном}$

Characteristics of the PBB with voltage regulation limits of $\pm 5\%$ $U_{ном}$

№ отв	Изменение напр. первичной обмотки, %	U ном сети, кВ	U2 при хх, кВ	Добавка напряжения, %	Коэфф. трансформации
1	+5	10	0,380	0	26,31
2	+2,5		0,390	2,5	25,64
3	0		0,400	5	25
4	-2,5		0,410	7,5	24,4
5	-5		0,420	10	23,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Характеристики ПБВ с пределами регулирования напряжения $\pm 10\%$ $U_{ном}$

Characteristics of the PBB with voltage regulation limits of $\pm 10\%$ $U_{ном}$

№ отв	Изменение напр. первичной обмотки, %	U ном сети, кВ	U2 при хх, кВ	Добавка напряжения, %	Коэфф. Трансформации
1	+10	10	0,380	0	26,31
2	+5		0,400	5	25
3	0		0,420	10	23,8
4	-5		0,440	15	22,73
5	-10		0,460	20	21,74

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Математическая модель сети 10 кВ также основана на методе обратных и простых итераций.

Результаты (Results)

Исходные данные и результаты расчетов сети 10 кВ представляются в виде таблицы 4. В столбец 4 этой таблицы может быть введен процент добавки напряжения после того узла, в строке которого введен процент ВДТ (ПАРН). Столбцы 12-13 таблицы содержат расчетные нагрузки узлов в соответствии со статическими характеристиками (12, 13). Столбцы 14, 15 содержат потери холостого хода и короткого замыкания трансформаторов ТП. В таблице 2 приведены также результаты расчетов напряжений в узлах в режиме максимальных нагрузок при ответвлениях №1 ПБВ всех ТП. При этом обеспечивается нулевая добавка напряжений с помощью трансформаторов ТП.

Таблица 4
Table 4

Исходные данные и результаты расчета сети 10 кВ в режиме максимальных нагрузок
Initial data and calculation results for a 10 kV network under maximum load conditions

Номер узла	Номер Стр	Длина участка, км	ВДТ, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уз, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.	
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		200	20	19,90	15,14	120,09	10,59		185,34	20,13	0,92	2,06
2	320	4		250	25	66,68	50,73	109,91	10,19		227,17	23,37	0,95	3,16
3	320	3		200	20	38,77	29,50	96,77	9,94		179,43	17,77	0,90	1,97
4	400	4		300	30	40,96	31,16	86,14	9,64		265,09	25,04	0,98	2,44
5	250	3		180	18	20,26	15,41	69,96	9,46		157,62	14,45	0,73	1,48
6	320	4		200	20	19,95	15,18	60,12	9,26		173,32	15,33	0,78	1,83
7	630	5		300	30	16,61	12,638	49,06	9,056		257,26	21,90	1,28	1,28
8	400	3		200	20	4,35	3,3098	32,42	8,979		170,81	14,33	0,85	1,01
9	250	1		200	20	0,62	0,4749	21,27	8,963		170,66	14,27	0,66	1,74
10	320	1		180	18	0,14	0,1066	10,08	8,955		153,5	12,81	0,73	1,44
Сумма		29		2210		228,23					1940,23		8,77	18,40

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчета напряжений в узлах сети 10 кВ представлены на рисунке 8, на котором также показана граница допустимых значений напряжений по условиям минимально допустимого напряжения на шинах 0,4 кВ ТП – Uмин.доп. = 380 В (рис. 2). Граница определена для случая использования ПБВ с пределами регулирования напряжения ±10% Uном. При этом максимальная добавка напряжения с помощью ПБВ составляет 10% при коэффициенте трансформации Kт = 23,8 (табл. 2). Тогда минимально допустимое по условиям качества электроэнергии напряжение на стороне 10 кВ составит 380*23,8 = 9044 В. Как видно из рисунка 8, начиная с узла №7, трансформаторы с пределами регулирования напряжения ±5% Uном не могут обеспечить нормируемое отклонение напряжения у удаленных потребителей ВЛ 0,4 кВ, так как напряжения этих узлов находятся ниже границы допустимых значений.

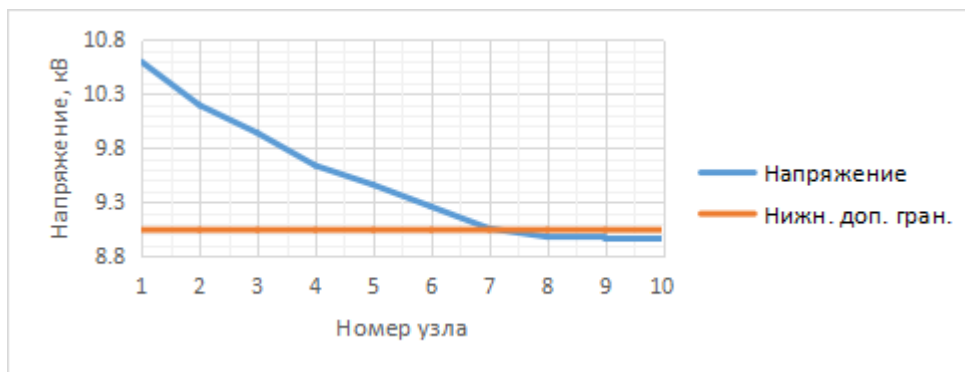


Рис. 8. Характер изменения напряжений в узлах сети 10 кВ Fig. 8. The nature of voltage changes in the nodes of the 10 kV network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование трансформаторов с пределами регулирования напряжения $\pm 10\%$ Уном

Трансформаторы 6-10/0,4 кВ с пределами регулирования напряжения ПБВ $\pm 10\%$ Уном для распределительных сетей в настоящее время в РФ не выпускаются. Однако изготовление таких трансформаторов при сохранении такого же количества ответвлений ПБВ, что и на ПБВ $\pm 5\%$ Уном, технических и экономических сложностей не представляет. В то же время, такие трансформаторы существенно расширяют возможности обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии в критических ситуациях протяженных и нагруженных ЛЭП 6-10 кВ. Ниже обосновывается возможность и целесообразность использования таких трансформаторов на примере рассматриваемой распределительной сети (рис. 2).

Режим максимальных нагрузок

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) напряжение питания в ЦП в режиме максимальных нагрузок принимается не ниже 10,5 кВ. В указанном режиме недопустимо низким может оказаться напряжение на шинах 0,4 кВ удаленных ТП. Для расчетов напряжение в ЦП принято равным 10,7 кВ.

Расчет проводится в три этапа:

Этап 1

Осуществляется расчет режима сети с максимальными суточными нагрузками на первом ответвлении ПБВ трансформаторов всех ТП (табл. 4). Затем определяется возможность обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии при наличии трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$. При этом учитывается максимальная добавка напряжения ПБВ, равная 20% при коэффициенте трансформации $K_t = 21,74$. Тогда минимально допустимое по условиям качества электроэнергии напряжение на стороне 10 кВ составит $380 \cdot 21,74 = 8261$ В. При этом граница допустимого минимального напряжения в узлах сети 10 кВ оказывается ниже напряжений узлов (рис. 9).

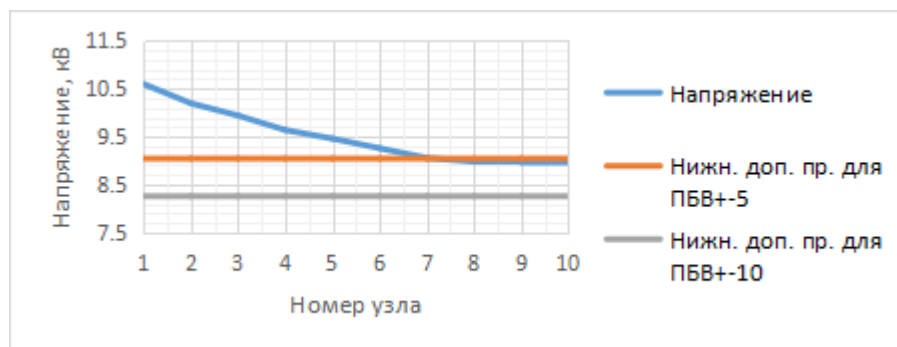


Рис. 9. Границы допустимых напряжений в узлах сети Fig. 9. Limits of permissible voltages in network nodes

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчета показывают принципиальную возможность обеспечения нормируемого показателя качества электроэнергии по длительному отклонению напряжения, так как напряжения всех узлов сети находятся в допустимой режимной области (выше границы допустимых напряжений).

Этап 2

Выбираются тип ПБВ ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$) и ответвления ПБВ для каждого узла ВЛ 10 кВ. Выбор осуществляется таким образом, чтобы на шинах 0,4 кВ ТП с пределами регулирования $\pm 5\%$ получить максимально возможное в пределах допустимого (418 в, рис. 2) напряжение, а на ТП с пределами $\pm 10\%$ — ближе к Умин. доп. Результаты выбора представлены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5

Результаты выбора типа ПБВ и номеров ответвлений
Results of selection of the type of PVB and branch numbers

Номер узла	U _{вн}	U _{нн}	Тип ПБВ	Номер отв.	Коэфф. Транс.	Добавка напр., В	Добавка мощности кВт	Нагрузка узла, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10,593	413	±5	2	25,64	18,180	3,381	203,38
2	10,193	405	±5	3	25	25,560	4,754	254,75
3	9,937	417	±5	5	23,8	47,397	8,816	208,82
4	9,636	404,8	±5	5	23,8	46,733	8,692	308,69
5	9,459	397,4	±5	5	23,8	46,144	8,583	188,58
6	9,258	389	±5	5	23,8	45,451	8,454	208,45
7	9,056	398	±10	4	22,73	62,162	11,562	311,56
8	8,979	395	±10	4	22,73	62,117	11,554	211,55
9	8,963	394	±10	4	22,73	61,753	11,486	211,49
10	8,955	393,9	±10	4	22,73	61,954	11,523	191,52

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Столбец 9 таблицы 5 содержит начальные нагрузки с их увеличением за счет добавок напряжения устройствами ПБВ трансформаторов (186 Вт на 1 В).

Этап 3

Производится расчет режима сети с увеличенными начальными нагрузками узлов. Результаты расчета приведены в таблице 6 и на рисунке 10. Эти результаты подтверждают возможность обеспечения нормируемых отклонений напряжения во всех узлах сети.

Таблица 6
Table 6

Результаты расчета режима сети в режиме максимальных нагрузок
Results of calculating the network mode in maximum load mode

Номер узла	Ном Стр	Длина участка, км	ВД Т, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I _{уч} , А	U _{уз} , кВ	U _{ном}	P _{узла стат.}	Q _{узла стат.}	Потери акт. мощности в трансф.	
				P _{уз} , кВт	Q _{уз} , кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dP _{тх}	dP _{тк}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		203	20,34	21,70	16,51	125,39	10,59		188,42	20,46	0,92	2,13
2	320	4		255	25,48	73,07	55,60	115,06	10,17		231,20	23,70	0,94	3,27
3	320	3		209	20,88	42,78	32,55	101,65	9,90		186,98	18,41	0,89	2,14
4	400	4		309	30,87	45,24	34,42	90,54	9,58		272,02	25,46	0,96	2,57
5	250	3		189	18,86	22,57	17,17	73,83	9,40		164,59	14,92	0,72	1,62
6	320	4		208	20,85	22,25	16,93	63,49	9,18		179,95	15,70	0,77	1,98
7	630	5		312	31,16	18,59	14,146	51,91	8,971		265,98	22,27	1,26	1,36
8	400	3		212	21,16	4,94	3,7564	34,53	8,889		179,82	14,81	0,83	1,12
9	250	1		211	21,15	0,71	0,54	22,68	8,871		179,60	14,74	0,65	1,92
10	320	1		192	19,15	0,16	0,122	10,78	8,863		162,6	13,32	0,71	1,61
Сумма		29		2299		252,00					2011,14		8,65	19,71

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

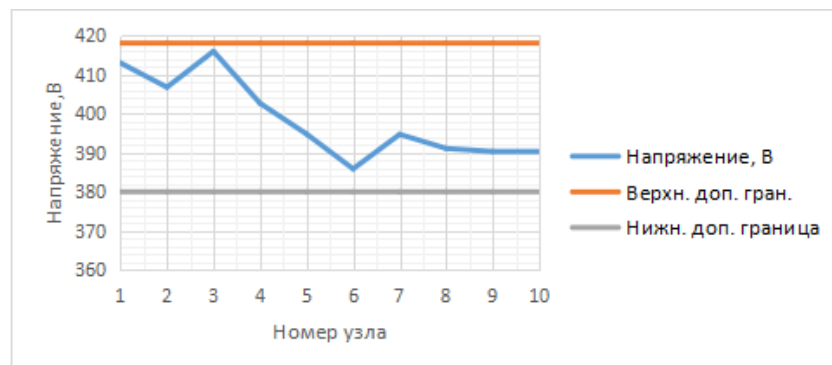


Рис. 10. Напряжения узлов в режиме максимальных нагрузок Fig. 10. Node stresses under maximum load conditions

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Режим минимальных нагрузок

Согласно ПУЭ в режиме минимальных нагрузок напряжение в ЦП должно поддерживаться не выше 10 кВ (принято 10 кВ), ответвления ПБВ остаются теми же, что и в режиме максимальных нагрузок. При этом должна исключаться вероятность превышения напряжений узлов верхней границы допустимых напряжений на шинах 0,4 кВ ТП (418 В, рис. 2). Задаваемые нагрузки узлов при этом приняты равными 0,4 нагрузок максимального режима, $\text{tg } \varphi = 0,2$.

В таблице 7 и на рисунке 11 представлены результаты расчета режима минимальных нагрузок рассматриваемой сети, которые показывают допустимость режима по показателям качества электроэнергии.

Таблица 7

Table 7

Результаты расчета режима сети в режиме минимальных нагрузок

Results of calculating the network mode in the minimum load mode

Номер узла	Ном Стр	Длина участка, км	ВД Т, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уч, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.		
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk	
															5
0	0								10,00	10,00					
1	250	1		81,6	16,31	3,51	2,67	50,46	9,95		73,23	14,54	0,81	0,33	
2	320	4		102,2	20,44	11,71	8,91	46,07	9,78		91,01	17,61	0,87	0,52	
3	320	3		82,9	16,58	6,79	5,17	40,51	9,67		73,40	13,95	0,85	0,34	
4	400	4		122,8	24,56	7,14	5,43	35,97	9,54		108,02	20,09	0,96	0,41	
5	250	3		74,8	14,95	3,54	2,69	29,23	9,46		65,49	12,02	0,73	0,26	
6	320	4		82,7	16,54	3,48	2,65	25,10	9,38		72,12	13,03	0,80	0,33	
7	630	5		124,0	24,79	2,90	2,2088	20,51	9,284		107,57	19,12	1,34	0,23	
8	400	3		83,9	16,78	0,77	0,5831	13,61	9,248		72,65	12,83	0,90	0,19	
9	250	1		83,9	16,78	0,11	0,0836	8,923	9,24		72,64	12,81	0,70	0,32	
10	320	1		75,9	15,18	0,02	0,0189	4,243	9,237		65,7	11,58	0,78	0,27	
Сумма		29		915			39,98				801,82		8,75	3,20	

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.



Рис. 11. Напряжения на шинах 0,4 кВ ТП в режиме минимальных нагрузок Fig. 11. Voltages on 0.4 kV TP buses in minimum load mode

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование ПАРН

Для обеспечения допустимого значения уровня напряжения произведен расчет с установкой ПАРН-С-ВДТ/СН-1-300-10000 с пределами регулирования напряжения $\pm 25\%$ от номинального напряжения. В настоящее время в РФ ПАРН широко используются для решения проблем с качеством электроэнергии в распределительных сетях с протяженными и нагруженными ЛЭП 6-10 кВ. Учитывая значительные пределы регулирования напряжения ПАРН, вопросы с качеством электроэнергии при этом не возникают. Однако варианты использования ПАРН по цене оказываются сопоставимыми с вариантами строительства резервных ВЛ 6-10 кВ. При сравнении с вариантом использования ПБВ $\pm 10\%$ в данной работе рассматривались обозначенные выше критерии: полезный отпуск мощности и ее потери. В таблице 8 и на рисунке 12 представлены результаты расчета режима максимальных нагрузок электрической сети с использованием ПАРН.

Таблица 8
Table 8

Режим максимальных нагрузок электрической сети с ПАРН
Maximum load mode of the electrical network with PARN

Номер узла	Номер Стр	Длина участка, км	ВД Т, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уч, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.	
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		203	20,34	21,86	16,64	125,87	10,59		188,42	20,45	0,92	2,13
2	320	4		255	25,48	73,70	56,07	115,55	10,16		231,15	23,68	0,94	3,27
3	320	3		209	20,88	43,20	32,87	102,15	9,89		186,92	18,39	0,89	2,14
4	400	4		309	30,87	45,75	34,81	91,04	9,57		271,87	25,40	0,96	2,56
5	250	3		189	18,86	22,87	17,40	74,33	9,38		164,48	14,87	0,72	1,61
6	320	4	12	200	20	17,78	13,53	56,76	10,39		183,48	19,39	0,98	2,06
7	630	5		300	30	14,79	11,253	46,3	10,19		272,62	28,05	1,62	1,44
8	400	3		200	20	3,87	2,946	30,58	10,12		181,08	18,43	1,08	1,14
9	250	1		200	20	0,56	0,4227	20,06	10,1		180,93	18,37	0,84	1,96
10	320	1		180	18	0,12	0,0949	9,507	10,1		162,8	16,51	0,93	1,62
Сумма		29		2244			244,50				2023,73		9,88	19,93

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

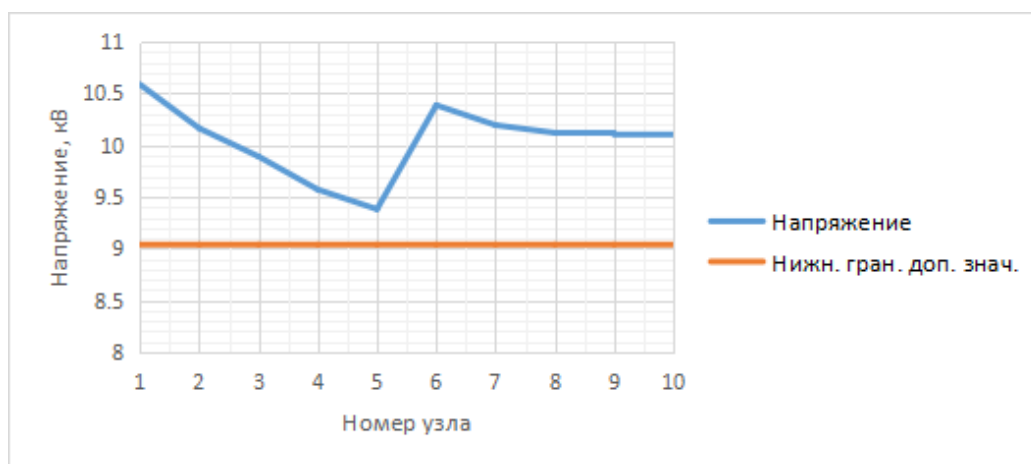


Рис. 12. Напряжения в узлах сети с ПАРН

Fig. 12. Voltages in network nodes with PARN

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

ПАРН установлен перед узлом №6 и повышает напряжение в этом узле на 12% (табл. 8). Все ТП имеют трансформаторы с пределами регулирования напряжения ПБВ $\pm 5\%$. При этом обеспечиваются нормированные показатели качества электроэнергии во всех узлах.

Обсуждение (Discussion)

Последние строки таблиц 6 и 8 позволяют сформировать оценочную таблицу режимных характеристик рассматриваемых вариантов сети.

Таблица 9
Table 9

Режимные характеристики вариантов электрической сети
Operating characteristics of electrical network options

	Сеть с ПАРН	Сеть с ПБВ $\pm 10\%$
Передаваемая в сеть мощность, кВт	2317	2291
Передаваемая полезная мощность, кВт	2023	2011
Потери мощности, кВт	294	280
Потери мощности, %	12,68	12,2

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Таким образом, рассматриваемые варианты электрической сети с точки зрения полезной отпускаемой мощности и ее потерь практически равноценны. Некоторое

увеличение потерь мощности в варианте с ПАРН связано с потерями в самом вольтодобавочном трансформаторе. В то же время стоимость ПАРН составляет около 10 000 000 рублей. Стоимость трансформатора с ПБВ $\pm 10\%$ при использовании стандартных переключателей будет равна стоимости серийно выпускаемых в настоящее время трансформаторов с ПБВ $\pm 5\%$. Таким образом, заказанные новые трансформаторы с ПБВ $\pm 10\%$ заменяют существующие, в рассматриваемом случае, начиная с узла №7, трансформаторы с ПБВ $\pm 5\%$, которые сохраняют эксплуатационную пригодность и могут быть направлены на замену физически изношенных трансформаторов в других сетях, не требующих расширенного диапазона регулирования. Такая замена позволит исключить приобретение новых трансформаторов с ПБВ $\pm 5\%$ для замены изношенных в сетях, не требующих расширенного диапазона регулирования напряжения. Последнее обстоятельство позволяет принять капитальные затраты по замене трансформаторов близкими к нулю (остаются только расходы на монтажные работы). В таких условиях сравнение рассматриваемых вариантов по экономическим критериям, например, по сроку окупаемости, представляется нецелесообразным ввиду явного преимущества варианта с ПБВ $\pm 10\%$.

С технической точки зрения эксплуатация трансформаторов с расширенными пределами регулирования ПБВ не представляет каких-то дополнительных отрицательных последствий. Выбранное рабочее ответвление ПБВ существенно влияет на потери холостого хода трансформатора в соответствии с выражением:

$$\Delta P_{\text{ххр\text{аб}}} = \Delta P_{\text{ххном}} \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{р\text{аб}}}} \right)^2 \quad (15)$$

где: $\Delta P_{\text{ххр\text{аб}}}$ – потери холостого хода при рабочем ответвлении ПБВ; $\Delta P_{\text{ххном}}$ – потери холостого хода на ответвлении, соответствующему номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$; $U_{\text{р\text{аб}}}$ – напряжение, соответствующее выбранному рабочему ответвлению ПБВ.

Так, например, при выбранном ответвлении №5 (табл. 3) с процентом уменьшения напряжения на 10%, т.е. до 9 кВ потери холостого хода в соответствии с выражением (14) увеличатся на 23,4%. Однако, такие трансформаторы предназначены для установки в конце протяженных ЛЭП и к их первичным обмоткам во всех режимах подводятся пониженные напряжения. В рассматриваемом примере эти напряжения в узле №7, начиная с которого установлены трансформаторы с ПБВ $\pm 10\%$, равны 8,97 кВ и 9,28 кВ для режимов максимальных и минимальных нагрузок соответственно. Поэтому потери холостого хода в этих трансформаторах существенно не изменятся, как не изменятся и напряжения, подводимые к каждому витку первичных обмоток.

Остается открытым вопрос точности регулирования напряжения предлагаемыми трансформаторами, связанный не с пределами регулирования напряжения, а со ступенями такого регулирования. Однако, повышение количества регулировочных ответвлений ПБВ, как и вопрос целесообразности РПН на трансформаторах 6-10 кВ распределительных сетей связан с существенными изменениями конструкции указанных трансформаторов, требует отдельного исследования и выходит за рамки данной статьи.

Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование демонстрирует, что оба рассмотренных метода – установка ПАРН и переход на трансформаторы с расширенным диапазоном ПБВ $\pm 10\%$ – позволяют решить ключевую задачу: поддерживать качество электроэнергии в пределах требований на всех узлах протяженной распределительной сети. Однако сравнительный анализ выявляет неоспоримые преимущества второго подхода.

Использование трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$ является не только технически эффективным, но и экономически оптимальным решением для подавляющего большинства типичных сетевых ситуаций. Его достоинство – близкий к нулевому срок окупаемости, достигаемый за счет ротации существующего парка оборудования без необходимости масштабных капиталовложений.

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать рассмотреть вопрос внедрения трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$ в качестве базового и достаточного мероприятия по регулированию напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ, исключая установку дорогостоящих ПАРН. Учитывая, что в настоящее время трансформаторы с пределами ПБВ $\pm 10\%$ заводами изготовителями не выпускаются, электросетевым предприятиям необходимо рассмотреть целесообразность заказов таких трансформаторов.

При этом установку ПАРН следует рассматривать для случаев, когда по расчетным параметрам режимов невозможно обеспечить качественное электроснабжение с использованием трансформаторов с расширенными пределами регулирования ПБВ.

Литература

1. Группа компаний «РОССЕТИ». Стандарт организации СТО 34.01-3.2.17-014.1-2020 «Методические указания по применению вольтодобавочных трансформаторов (пунктов регулирования напряжения) 6-20 кВ и вольтодобавочных трансформаторов 0,4 кВ в линиях электропередачи распределительных сетей». Том 1.1. Методические указания. Стандарт организации. Дата введения: 04.03.2020.
2. АО «Сетевая компания». Интегрированный годовой отчет 2024. [Электронный ресурс]. <https://gridcom-rt.ru/upload/iblock/7e2/8kej5fgkvui161iozmguwfx2knqcnw4/GO%202025-3-Release-3.pdf>. Режим доступа: (дата обращения 04.11.2025)
3. Борисов Д. А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е. Методика прогнозирования нагрузки в электроэнергетических системах: алгоритм эффективного управления // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 6. С. 99-111.
4. Петрова Р.М., Грачева Е.И. Оценка параметров надежности схем электроснабжения с трансформаторными подстанциями при выполнении технико-экономических расчетов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17, № 2(66). С. 3-18.
5. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Энергосберегающее регулирование напряжения в узлах нагрузки // Новости электротехники. 2018. №5. С. 56-60.
6. Коноплев Н.Е., Компанец Б.С. Снижение потерь электроэнергии на участке сети путем оптимизации уровня напряжения методом штрафных функций // Вестник ПНИПУ, Барнаул. 2023. №48. С. 50-71.
7. РД-34.09.254 «Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений» (дата актуализации – 01.01.2021 г.).
8. Перинский Т.В. Увеличение пропускной способности ВЛ 6-10 кВ // Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция. Линии электропередачи 2008. Новосибирск. 2008. С.226-228.
9. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Зависимость напряжения и потерь мощности от напряжения. Реальность повышения потребления электроэнергии // Новости электротехники. 2018. №2. С. 48-53.
10. Сухие силовые трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой. [Электронный ресурс]. <https://svel.ru/catalog/sukhie-transformatory/sukhie-silovye-transformatory/silovoy-transformator-s-rpn>. Режим доступа: (дата обращения 15.10.2025)
11. Яхин Ш.Р., Пигалин А.А., Галиев И.Ф., Маклецов А.М. Анализ нагрузочных режимов и регулировочной способности по напряжению распределительной сети при оптимизации секционирования на ее участках / Энергоэнергия. Передача и распределение. 2024. №1. С. 34-42.
12. Galiev I.F., Garifullin M.S., Alekseev I.P. [et al.]. Development of an integrated expert system for distribution network diagnostics based on artificial intelligence technology // International Russian Smart Industry Conference. 2023. pp. 6-14, doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110786.
13. M. Nijhuis, M. Gibescu и JFG Cobben, Incorporation of on-load tap changer transformers in low-voltage network planning. // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2016. pp. 1–6.
14. Modelling and Aggregation of loads in flexible Power Networks // CIGRE WG C4.605, 214. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/315664589> (дата обращения 01.11.2024)
15. Балдов С.В., Бушуева О.А., Кормилицин Д.Н. [и др.]. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вестник ИГЭИ. 2014. Вып. 6. С.34-44.
16. Хрущев Ю.В., Панкратов А.В., Бацева Н.Л. [и др.] Методики идентификации статистических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Известия ТПУ. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4. С.164-174.
17. Банных П.Ю., Бартоломей П.И., Бураков Г.Е. [и др.]. Расчет технических потерь электрической энергии в распределительных электрических сетях с учетом статических характеристик нагрузки // Энергоэнергия. Передача и распределение. 2024. №3. С. 34-45.
18. Chend C.S., Shirmohammadi D. A Three-phase power flow solution method for real-time analysis distribution system analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 1995. Vol. 18. No4. pp. 1283-1290.
19. Аюев Б.И. Давыдов В.В., Ерохин П.М., В.Г. и др. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах // Москва: Флинта: Наука. 2008. 256 с.

20. Свеженцова О.В., Умнова М.О. Расчет установившихся режимов радиальной электрической сети на напряжении 0,4 кВ интервальным методом // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2015. № 3 (98). С. 215-222.

Авторы публикации

Фарраев Азат Ильгизович – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *farraev99@mail.ru*

Маклецов Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *mac.am@mail.ru*

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *viktor.maksimov.1968@mail.ru*

Куракина Ольга Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *random_jj@mail.ru*

References

1. Rosseti Group of Companies. Organization Standard STO 34.01-3.2.17-014.1-2020 "Guidelines for the Use of 6-20 kV Voltage-Adding Transformers (Voltage Regulation Points) and 0.4 kV Voltage-Adding Transformers in Power Transmission Lines of Distribution Networks". Volume 1.1. Methodical instructions. The standard of the organization. Date of introduction: 04.03.2020.
2. Grid Company JSC. Integrated Annual Report 2024 [Electronic resource]. <https://gridcom-rt.ru/upload/iblock/7e2/8kej5fgkvui161iozmgufjx2knqcnw4/GO%202025-3-Release-3.pdf> Access mode: (accessed 04.11.2025)
3. Borisov D. A., Maksimov V. V., Vorkunov O. V., Kurakina O. E. Methodology for forecasting the load in electric power systems: an algorithm for effective control // *News of higher educational institutions. Problems of energy*, 2025. Vol. 27, No. 6. pp. 99-111.
4. Petrova R.M., Gracheva E.I. Assessment of reliability parameters of power supply schemes with transformer substations when performing technical and economic calculations // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2025. Vol. 17, No. 2(66). pp. 3-18.
5. Kuchumov L.A., Kuznetsov A.A. Energy-saving voltage regulation in load nodes // *Electrical engineering news*. 2018. №5. pp. 56-60.
6. Konoplev N.E., Kompaneets B.S. Reduction of electricity losses in the network section by optimizing the voltage level by the method of penalty functions // *Vestnik PNRPU, Barnaul*, 2023. No48. pp. 50-71.
7. RD-34.09.254 Instructions for reducing the technological consumption of electric energy for transmission through electric grids of power systems and power associations (updated on 01.01.2021).
8. Perinsky T.V. Increase in the throughput capacity of 6-10 kV overhead lines. The Third Russian Scientific and Practical Conference with International Participation // *Power Transmission Lines, Novosibirsk*. 2008. pp. 226-228.
9. L.A., Kuznetsov A.A. Dependence of voltage and power losses on voltage. The reality of increasing electricity consumption // *Electrical engineering news*. 2018. №2. pp. 48-53.
10. Dry-type power transformers with voltage regulation under load [Electronic resource]. <https://svel.ru/catalog/sukhie-transformatory/sukhie-silovye-transformatory/silovoy-transformator-s-rpn> Access mode: (accessed 15.10.2025)
11. Yakhin Sh.R., Pigalin A.A., Galiev I.F., Makletsov A.M. Analysis of load modes and voltage control capacity of a distribution network when optimizing sectioning in its sections // *Electric power. Transmission and distribution*. 2024. №1. pp. 34-42.
12. Galiev I.F., Garifullin M.S., Alekseev I.P. and others. Development of an integrated expert system for distribution network diagnostics based on artificial intelligence technology // *International Russian Smart Industry Conference*. 2023. pp. 6-14, doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110786.
13. M. Nijhuis, M. Gibescu и JFG Cobben, Incorporation of on-load tap changer transformers in low-voltage network planning. // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2016. pp. 1–6.

14. Modelling and Aggregation of loads in flexible Power Networks. CIGRE WG C4.605, 214. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/315664589> Access mode: (accessed 01.11.2024)

15. Baldov S.V., Bushueva O.A., Kormilitsin D.N. [et al.]. Determination of Static Characteristics of Voltage Load in Electric Networks with Complex Load // *Bulletin of IGEI*. 2014. Iss. 6. pp.34-44.

16. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L. [et al.] Methods for Identification of Statistical Characteristics of Load Based on the Results of Active Experiment // *Proceedings of TPU. Engineering and Technology in the Energy Sector*. 2014. T. 325. No 4. pp. 164-174.

17. Bannykh P.Yu., Bartolomei P.I., Burakov G.E. [et al.] Calculation of technical losses of electric energy in distribution electric networks taking into account the static characteristics of the load. Electric power // *Transmission and distribution*. 2024, №3. pp. 34-45.

18. Chend C.S., Shirmohammadi D. A Three-phase power flow solution method for real-time analysis distribution system analysis // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1995. Vol. 18. No4. pp. 1283-1290.

19. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M., Neuymin V.G. Computational Models of Flow Distribution in Electric Systems // *Moscow: Flint: Nauka*, 2008. 256 p.

20. Svezhentsova O.V., Umnova M.O. Calculation of steady-state modes of radial electric network at 0.4 kV voltage by interval method // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015. № 3 (98). pp. 215-222.

Authors of the publication

Azat I. Farraev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. farraev99@mail.ru

Alexander M. Makletsov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. mac.am@mail.ru

Viktor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. viktor.maksimov.1968@mail.ru

Olga E. Kurakina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. random_jj@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 22.01.2026 г.

Отредактировано 28.01.2026 г.

Принято 11.02.2026 г.