

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

V. ZORIN, R. BUYNYY, E. SAENKO, D. SHAROV

PROVIDING THE REQUIRED QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN POWER SYSTEMS

Аннотация. Наведено науково-технічне обґрунтування забезпечення необхідної якості електричної енергії в системах електропостачання. Показано, що в разі електричних мереж з однорідними навантаженнями норми ГОСТ13109-97 можуть бути виконані за допомогою основних засобів регулювання напруги без додаткових капіталовкладень. При наявності неоднорідних навантажень розрахунки режимів істотно ускладнюються, і для забезпечення нормованих значень відхилень напруги на затискачах електричних приймачів потрібно використання додаткових засобів регулювання напруги. Наведено приклад розрахунку режиму напруги і вибору параметрів вольтододаткових трансформаторів.

Ключові слова: забезпечення необхідної якості електроенергії, однорідні навантаження, неоднорідні навантаження, розрахунок режиму напруги.

Аннотация. Приведено научно-техническое обоснование обеспечения необходимого качества электрической энергии в системах электроснабжения. Показано, что в случае электрических сетей с однородными нагрузками нормы ГОСТ13109-97 могут быть выполнены с помощью основных средств регулирования напряжения без дополнительных капиталовложений. При наличии неоднородных нагрузок расчеты режимов существенно усложняются, и для обеспечения нормированных значений отклонений напряжения на зажимах электрических приемников потребуются использование дополнительных средств регулирования напряжения. Приведен пример расчета режима напряжения и выбора параметров вольтодобавочных трансформаторов.

Ключевые слова: обеспечение необходимого качества электроэнергии, однородные нагрузки, неоднородные нагрузки, расчет режима напряжения.

Annotation. The article gives the scientific and technical rationale for providing the necessary quality of electric energy in the electricity system. It is shown that in the case of electrical networks with uniform loads, standards GOST 13109-97 can be performed using the basic means of voltage regulation without additional investment. Calculates of modes are appreciably more complicated in the presence of non-uniform loads and for the normalizing values of voltage deviations at the terminals of electrical receivers require the use of additional means of regulating the voltage. Here is an example of calculation the mode voltage and the choice of parameters booster transformer.

Key words: providing the necessary quality of electric energy, uniform loads, non-uniform loads, mode voltage calculation.

Введение

Отклонения напряжения от номинального значения являются важнейшим показателем режима систем электроснабжения, что оказывает существенное влияние как на эффективность

работы электроприемников, так и на технико-экономические показатели электрических сетей. Требования к качеству электрической энергии отражены в межгосударственном стандарте ГОСТ 13109-97. Нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонений напряжения $\delta U_{\%}$ на зажимах любых электроприемников должны быть равны соответственно $\pm 5\%$ с интегральной вероятностью 0,95 и не допускающие отклонений напряжения более чем $\pm 10\%$. При соблюдении этих норм обеспечивается электромагнитная совместимость электрических сетей и электроприемников, что считается экономически обоснованным.

Основными факторами, оказывающими влияние на режим напряжений, являются вид и характер электрических нагрузок, а также условия регулирования напряжения, которые, в свою очередь, определяются составом и характером потребителей электрической энергии. С этой точки зрения различают электрические сети с однородной и разнородной нагрузкой.

К сетям с однородной нагрузкой относятся такие сети, у которых к центрам питания подключаются потребители с приблизительно одинаковыми формами графиков электрических нагрузок, т.е. у которых периоды максимальных и минимальных нагрузок совпадают. Это дает возможность при анализе режима напряжения рассматривать только два периода – максимальных и минимальных нагрузок и вести расчет и оптимизацию режима напряжений по предельным отклонениям напряжения $\delta U_{\text{дон}}^{\text{н}} = -5\% \leq \delta U \leq \delta U_{\text{дон}}^{\text{о}} = +5\%$. В большинстве литературных источников, посвященных вопросам регулирования напряжения в электрических сетях, решались, в основном, задачи в предположении однородности нагрузок [1,2]. При таких допущениях, как будет показано ниже, не удастся правильно оценить режим напряжения и выбрать необходимые средства и способы регулирования напряжения.

К сетям с неоднородной нагрузкой относятся такие, у которых графики нагрузок отдельных линий или потребителей одной линии существенно отличаются. Так, например, при формировании городской электрической сети предусматривается централизованное электроснабжение, когда к шинам центров питания, помимо коммунально-бытовых и общественных нагрузок, подключается целый ряд одно-, двух- и трехфазных предприятий. В этом случае анализ режима напряжения и его регулирование существенно усложняется и, как правило, требует применения дополнительных, местных средств регулирования напряжения.

Способы и методы решения

Рассмотрим расчет и оптимизацию режима напряжения в электрических сетях по предельным отклонениям [3,4] в предположении однородности нагрузок. Отклонения напряжения в любой i -й точке сети $\delta U_{i(t)}$ и для любого момента времени суток $\beta = P_t / P_{\text{max}}$ могут быть рассчитаны как разность возможных добавок напряжения ($E_{\text{П}}$ – на шинах ЦП и $E_{\text{Т}}$ – на трансформаторе 10/0,4 кВ) и потерь напряжения на элементах сети (в сети среднего напряжения $\Delta U_{\text{С}}$, трансформаторе 10/0,4кВ $\Delta U_{\text{Т}}$ и сети низкого напряжения $\Delta U_{\text{Н}}$).

$$\delta U_{i(t)} = E_{\text{П}(t)} + E_{\text{Т}} - \beta_{i(t)} \cdot (\Delta U_{\text{С}} + \Delta U_{\text{Т}} + \Delta U_{\text{Н}}). \tag{1}$$

Фрагмент распределительной сети 10кВ показан на рис.1.

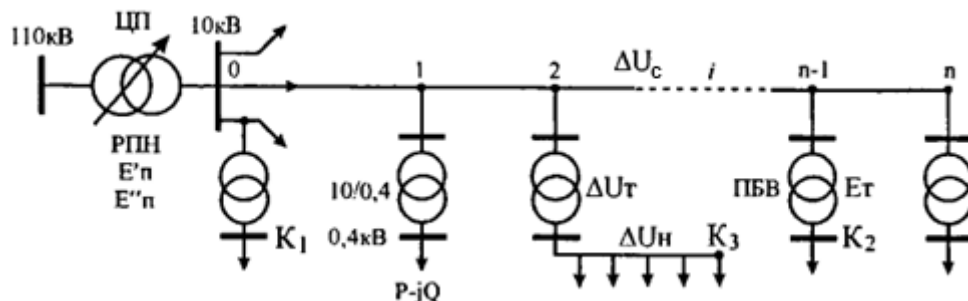


Рис.1. Схема распределительной сети

В процессе анализа режима напряжения могут быть решены следующие оптимизационные задачи:

- выбор и расстановка ответвлений на трансформаторах 10/0,4кВ с ПБВ, $E_{\text{Т}} = ?$;

- определение диапазона и закона регулирования напряжения на шинах ЦП, $E_{II}' = ?$, $E_{II}'' = ?$, $E_{II(t)} = f(\beta) = ?$;
- определение допустимой потери напряжения в сети 0,38/0,22кВ, $\Delta U_{н.дон} = ?$;
- построение и анализ закона регулирования напряжения на шинах ЦП и картограммы напряжений.

Выбор и расстановка ответвлений на трансформаторах 10/0,4кВ ($E_T = ?$) в зависимости от потерь напряжения в сети 10кВ ΔU_C приведена в табл.1.

Таблица 1

Расстановка E_T

Номер ответвления, n	1	2	3	4	5
Добавка, $E_T, \%$	0	2,5	5	7,5	10
Потери в сети, $\Delta U_C, \%$	0...2,5	2,5...5	5...7,5	7,5...10	≥ 10

Добавка напряжения на шинах ЦП в максимальном режиме E_{II}' по условиям контрольной точки K_1 (рис.1) определяется по формуле:

$$E_{II}' = \delta U_{дон}^s - E_T + \Delta U_C + \Delta U_T. \quad (2)$$

Для режима минимальных нагрузок рассматриваются два случая – недопущение превышения отклонений напряжения сверх $\delta U_{дон}^s$ по условиям контрольной точки K_2 (рис.1), формула (3), и недопущение снижения отклонений напряжения ниже величины $\delta U_{дон}^n$ по условиям контрольной точки K_3 (рис.1), формула (4).

$$E_{II}^{s'} = \delta U_{дон}^s - E_T^{наиб} + \beta \cdot (\Delta U_C + \Delta U_T), \quad (3)$$

$$E_{II}^{n'} = \delta U_{дон}^n - E_T^{наим} + \beta \cdot (\Delta U_C + \Delta U_T + \Delta U_H). \quad (4)$$

В качестве расчетного значения ΔU_T принимается среднее значение. При проведении расчетов по регулированию напряжения следует определить допустимую потерю напряжения в сети 0,38/0,22кВ. Под $\Delta U_{дон}$ понимают такую величину, при которой можно гарантировать соблюдение норм ГОСТ 13109-97. Для существующих трансформаторов с пятью ответвлениями и величиной ступени $\Delta E_{CT} = 2,5\%$ допустимая потеря напряжения будет равна:

$$\Delta U_{дон} = \delta U_{дон}^s - \delta U_{дон}^n - \Delta E_{CT} = 5 - (-5) - 2,5 = 7,5\%. \quad (5)$$

Построение картограммы напряжения рассмотрим на конкретном примере [3,5] по следующим исходным данным: $\Delta U_C^{наиб} = 14\%$, $\Delta U_T = 4\%$, $\Delta U_H = 7,5\%$, отношение минимальной нагрузки P_{min} к максимальной P_{max} равно $\beta = 0,25$.

Расстановку ответвлений на трансформаторах с ПБВ определяем по табл.1. Далее определяем добавки напряжения на шинах ЦП в максимальном и минимальном режимах по формулам 2,3,4.

$$E_{II}' = 5 - 0 + 0 + 4 = +9\%,$$

$$E_{II}^{s'} = 5 - 10 + 0,25 \cdot (10 + 4) = -1,5\%,$$

$$E_{II}^{n'} = -5 - 0 + 0,25 \cdot (2,5 + 4 + 7,5) = -1,5\%.$$

Закон регулирования напряжения на шинах ЦП $E_{II(t)} = f(\beta)$ приведен на рис.2.

Картограмма напряжения показана на рис.3. Линии на картограмме характеризуют изменение отклонений напряжения для рассматриваемой ЛЭП в максимальном и минимальном режимах на шинах 10кВ трансформатора (линии 1 и 4), на шинах 0,4кВ трансформатора (линии 2 и 5), а также в конце ЛЭП 0,38/0,22кВ (линии 3 и 6).

Как видно из картограммы напряжений для сетей с однородными нагрузками и при отсутствии ограничений по регулированию напряжения на шинах ЦП, обеспечить нормированные величины отклонений напряжения для всех потребителей, получающих питание по линии 10 кВ, потеря напряжения на которой может достигать $\Delta U_C = 12,5\%$, удастся только с помощью основных средств регулирования (E_{II} и E_T). И только в конце линии, у удаленных потребителей сети 0,38/0,22 кВ напряжение опускается ниже $\delta U_{дон}^n = -5\%$ в максимальном режиме.

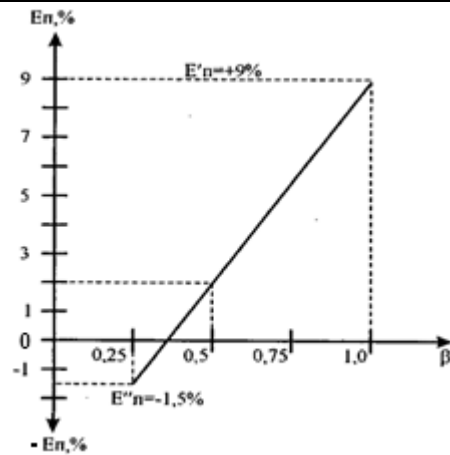


Рис.2. Закон регулирования на шинах ЦП

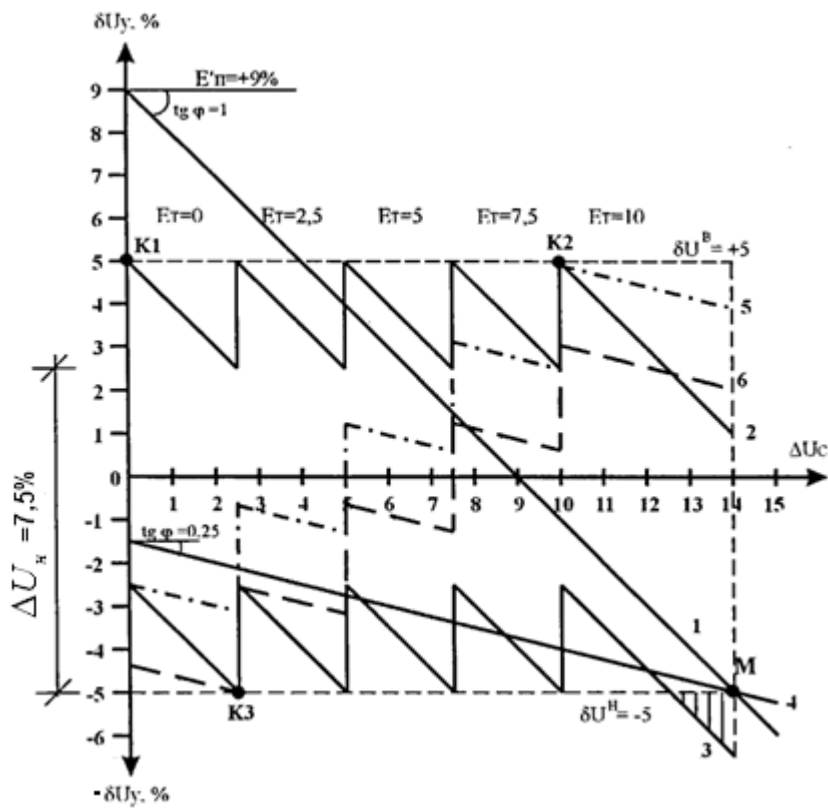


Рис.3. Картограмма напряжений для минимального и максимального режимов

Однако такие благоприятные условия выдерживаются далеко не всегда [3]. Это может быть проиллюстрировано на примере, когда режим встречного регулирования на шинах ЦП ограничен или задан заранее: $E'_n = +5\%$, $E''_n = 0\%$, а $\Delta U_c^{наиб} = 8\%$, $\Delta U_n = 7,5\%$, $\Delta U_T = 4\%$, $\beta = 0,25$.

Картограмма напряжений при расстановке E_T по условиям максимального режима показана на рис.4, из которого видно, что в этом режиме отклонения напряжения находятся в пределах нормы $\delta U = \pm 5\%$. В то же время в режиме минимальных нагрузок у $\Delta U_c = 3,5\%$ отклонения напряжения выходят за уровень $\delta U_{дон}^e = +5\%$. Значит, добавки напряжения $E_T = 7,5\%$ и $E_T = 10\%$ не могут быть использованы.

Произведем расстановку ответвлений по условиям минимального режима так, чтобы в этом режиме отклонения напряжения оказывались в норме. При этом могут быть использованы только $E_T = 2,5\%$ и $E_T = 5\%$. Для этого случая построена картограмма на рис.5, где видно, что теперь в

максимальном режиме отклонения напряжений выходят значительно за нижний допустимый предел $\delta U_{\text{дон}}^H = -5\%$.

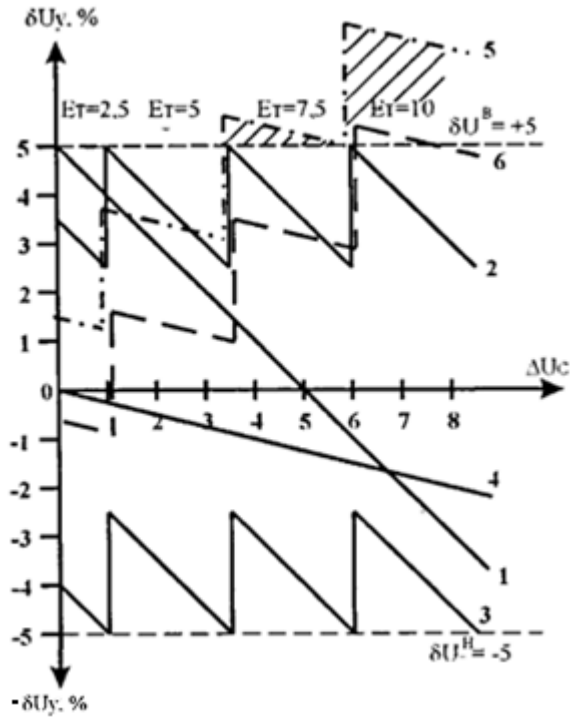


Рис.4. Картограмма напряжений при расстановке E_T по условиям максимального режима

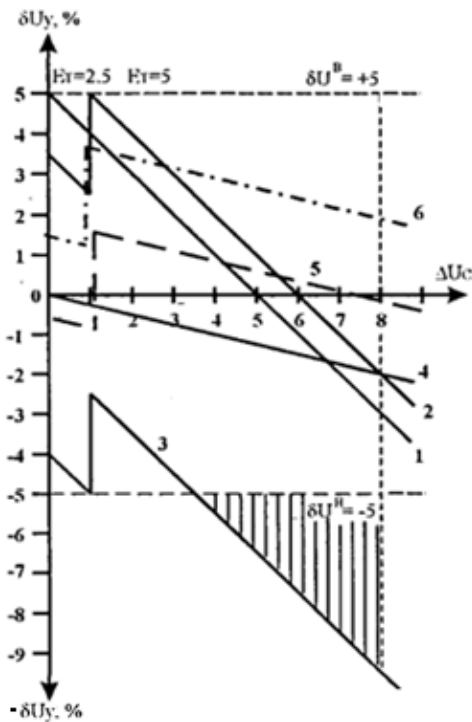


Рис.5. Картограмма напряжений при расстановке E_T по условиям минимального режима

Таким образом, как в первом, так и во втором случае для обеспечения норм ГОСТ 13109-97 требуется проведение дополнительных мероприятий по регулированию напряжения.

Рассмотрим особенности регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с неоднородной нагрузкой, представленной на рис.6. Здесь неоднородность состоит в том,

что к общим шинам 10 кВ ЦП подключены ЛЭП, питающие потребителей с разными трехступенчатыми графиками нагрузки (ЛЭП1 – коммунально-бытовая нагрузка, ЛЭП2 – однофазная промышленная нагрузка, ЛЭП3 – двухфазная промышленная нагрузка). Исходные данные для расчетов приведены рядом с графиками нагрузок.

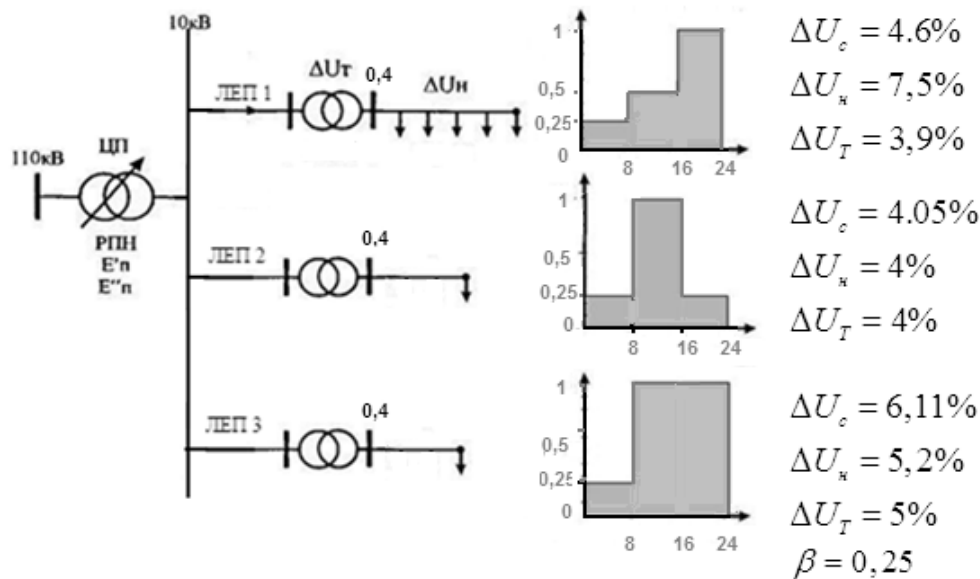


Рис.6. Схема распределительной сети с неоднородной нагрузкой

Предположим, что выбор диапазона и закона регулирования напряжения на шинах ЦП производился по более весомой коммунально-бытовой нагрузке по формулам 2,3,4 и показан на рис.7, где $E_{II}^{\prime} = +8,9\%$, $E_{II}^{(a)} = 4,1\%$, $E_{II}^{(h)} = -1,5\%$, $E_{II,cp}^{\prime} = 1,3\%$.

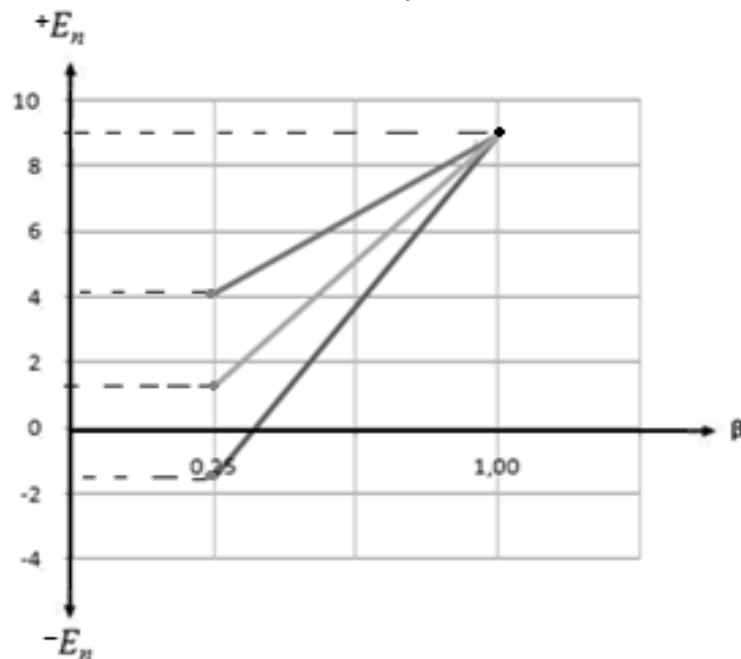


Рис.7. Закон регулирования напряжения на шинах ЦП по условиям коммунально-бытовой нагрузки

Выбор добавок напряжения E_T на трансформаторах с ПБВ осуществлен в соответствии с табл.1.

Картограмма напряжения для ЛЭП-1 с коммунально-бытовой нагрузкой приведена на рис.8. Из картограммы следует, что в любой момент времени и в любой точке сети 0,38 кВ отклонения напряжения находятся в пределах допустимых $\delta U_{дон} = \pm 5\%$.

Рассмотрим, что при этом происходит с режимом напряжения на ЛЭП-2, питающей однофазную нагрузку. На рис.9 показана картограмма напряжения для случая регулирования напряжения на шинах ЦП по условиям к/б нагрузки и ответвления на трансформаторах с ПБВ принято $E_T = 0$.

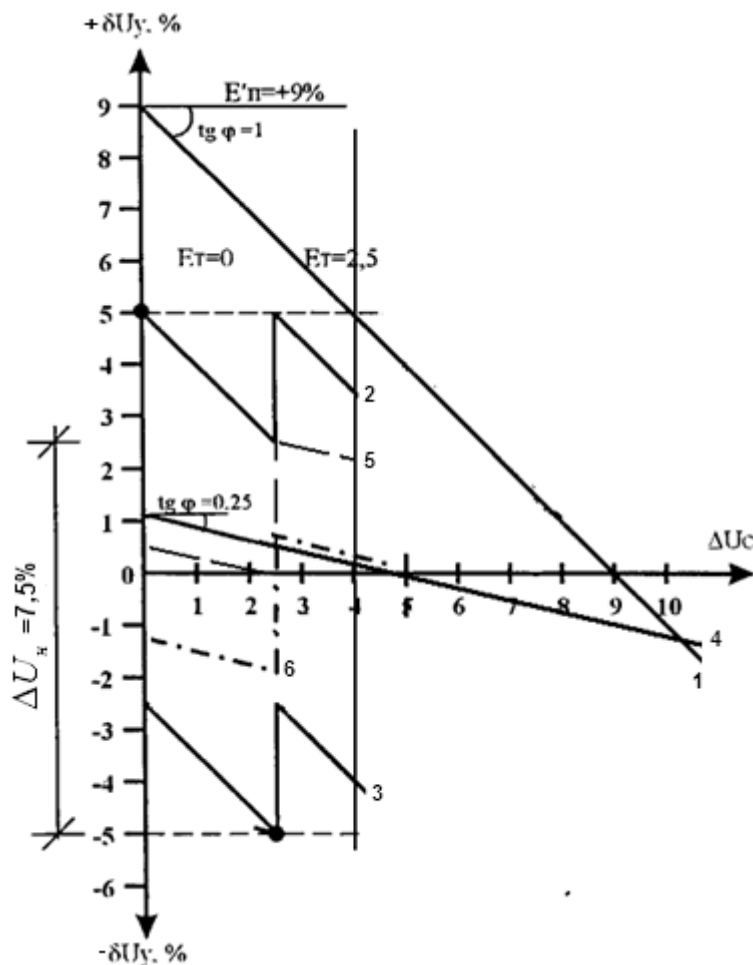


Рис.8. Картограмма напряжений для ЛЭП-1 с коммунально-бытовой нагрузкой при расстановке E_T по условиям коммунально-бытовой нагрузки

Из картограммы видно, что только ночью отклонения напряжения соответствуют нормам ГОСТ 13109-97, а в остальные периоды времени (днем и вечером) значительно превышают допустимые отклонения $\delta U_{\text{опн}} = \pm 5\%$.

Отсюда видно, что только с помощью основных средств регулирования напряжения не удастся обеспечить нормированные значения отклонений напряжения для всех потребителей с разнородными графиками нагрузок.

Здесь следует воспользоваться дополнительными средствами регулирования в виде вольтдобавочных трансформаторов (ВДТ). Известно, что мощность ВДТ зависит от проходной мощности, протекающей по ЛЭП $S_{\text{прох}}$ и предельной добавки напряжения на ВДТ $\pm E_{\text{ВДТ}}^{\text{пред}}$. Тогда требуемая мощность ВДТ будет равна:

$$S_{\text{ВДТ}} = \frac{S_{\text{прох}} \cdot E_{\text{ВДТ}}^{\text{пред}}}{100} \% . \quad (6)$$

В случае, когда положительные и отрицательные отклонения напряжения в сети 0,38 кВ не одинаковые, их можно уравнивать с помощью соответствующего подбора ответвлений сетевых трансформаторов с ПБВ ($E_T = 0\%$, $E_T = 2,5\%$ и т.д.). Это позволит обеспечить ВДТ минимальной мощности $S_{\text{ВДТ}}^{\text{мин}}$. Картограмма напряжений, которая получена в результате рационального выбора

E_T и $E_{ВДТ}$, приведена на рис.10, а закон регулирования напряжения на ВДТ показан в табл.2.

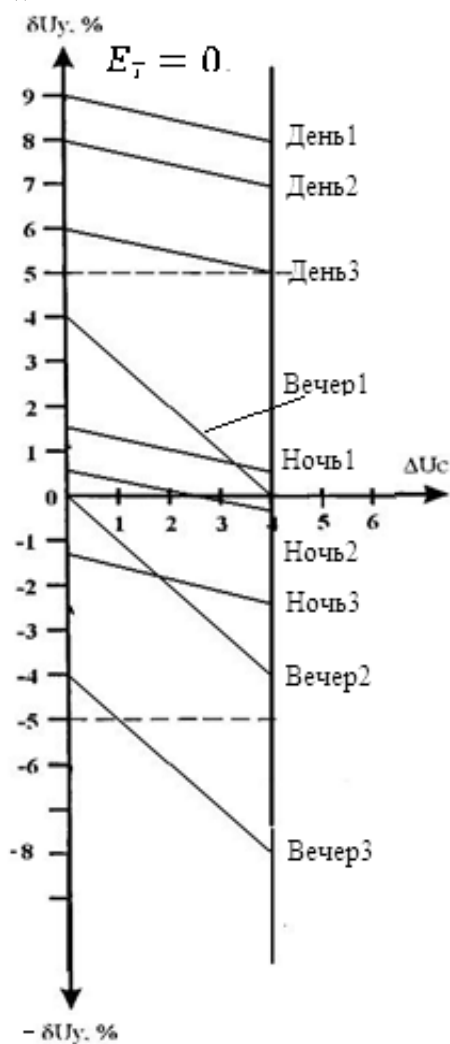


Рис.9. Картограмма напряжения для промышленной нагрузки (1-сменной) в случае регулирования напряжения на шинах ЦП по условиям коммунально-бытовой нагрузки

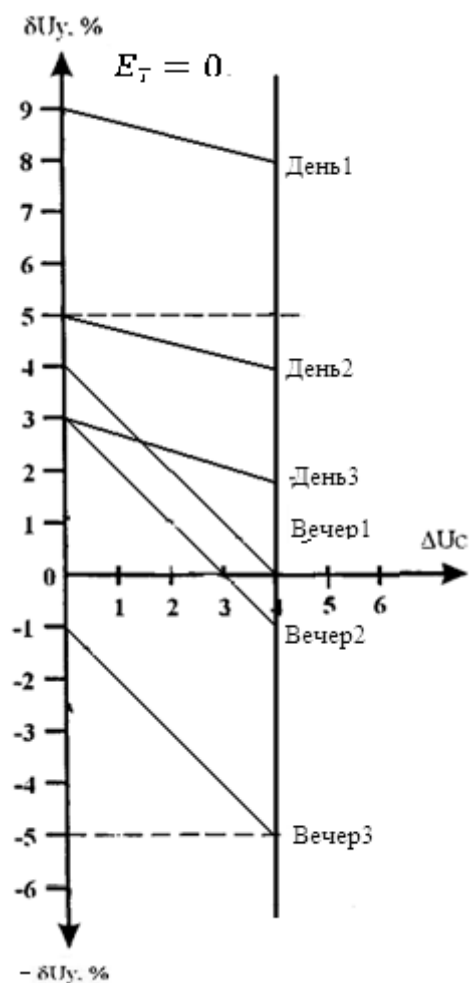


Рис.10. Картограмма напряжения для промышленной нагрузки (1-сменной) с учетом ВДТ в случае регулирования напряжения на шинах ЦП по условиям коммунально-бытовой нагрузки

Аналогичные расчеты были проведены еще для двух случаев, когда закон регулирования напряжения на шинах ЦП выбирался по условиям режима работы односменных и двухсменных предприятий. При этом проверялись режимы напряжений всех потребителей, подключенных к ЛЭП-1, ЛЭП -2, ЛЭП -3, и выбирались дополнительные средства регулирования напряжения в виде ВДТ. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон и закон регулирования ВДТ

$E_{II} = f(\beta)$	По режиму к/б, %			По режиму 1 см, %			По режиму 2 см, %		
	к/б	1 см	2 см	к/б	1 см	2 см	к/б	1 см	2 см
Ночь	0	0	0	0	0	0	0	0	0
День	0	-3	-4	-5	0	-2	-4	-2	0
Вечер	0	+3	+6	+8	0	+8	+6	+5	0

В качестве расчетного принимается тот вариант, который обеспечивает минимальную стоимость ВДТ.

Выводы

1. При однородных нагрузках с помощью только основных средств регулирования напряжения могут быть обеспечены нормы ГОСТ 13109-97 для протяженных линий 10 кВ, потеря напряжения в которых достигает $\Delta U_c = 12,5\%$.
2. Если режим встречного регулирования напряжения на шинах ЦП ограничен или заранее задан, обойтись без использования дополнительных средств регулирования напряжения, как правило, не представляется возможным. В качестве таких средств могут быть использованы конденсаторные батареи поперечного и продольного включения, вольтодобавочные трансформаторы и линейные регуляторы (ЛР), а также фазопереключаемые вольтодобавочные трансформаторы (ФВДТ).
3. Неоднородность электрических сетей напряжения 10 кВ может быть двух видов. Первый - это когда к шинам ЦП подключены линии, графики нагрузок которых отличаются. Здесь в качестве дополнительных средств регулирования напряжения целесообразно использовать ВДТ. И второй - это когда различные по виду потребители получают питание по одной магистральной линии 10 кВ. Здесь для нормализации режима напряжений целесообразно применить конденсаторные установки поперечного включения.
4. При решении задач обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях с неоднородной нагрузкой следует полностью использовать основные средства регулирования напряжения ($E_{л}$ и $E_{т}$), не требующие дополнительных капиталовложений. Использование дополнительных мероприятий и технических средств следует осуществлять на основе вариантных расчетов.
5. Расчет, оценка и оптимизация режимов напряжения в сетях с неоднородной нагрузкой по предельным отклонениям напряжения становятся не наглядными и связаны с вычислительными трудностями. В этих случаях можно рекомендовать использование интегральных критериев качества электрической энергии.

Литература

1. В.А. Козлов Электроснабжение городов // Энергоатомиздат. – 1988. – 264с.
2. М.А. Мельников, Л.А.Солдаткина Регулирование напряжений в электрических сетях. – М.: Энергия, 1968. – 153с.
3. В.В.Зорин, В.В. Тисленко Системы электроснабжения общего назначения: учебник для студентов вузов. – Чернигов, 2005. – 341с.
4. В.В.Зорін Моделювання та оптимізація параметрів і режимів систем електропостачання міст // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1998. - №2 – С.22-28.
5. В.А.Козлов, Н.И.Билик, Д.Л.Файбисович Справочник по проектированию электроснабжения городов. – Л.:Энергия, 1986. – 256с.