



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Никитин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., ассистент ОЭЭ ИШЭ
8 корпус (248 аудитория)
*nikitindmsr@yandex.ru***

| | Количество | Балл за ед. | Балл сумм. |
|---------------------|------------|-------------|------------|
| ИДЗ | 1 | 8 | 8 |
| Контрольная работа | 2 | 6 | 12 |
| Лабораторная работа | 8 | 5 | 40 |
| ИТОГО | | | 60 |



Под **отклонением напряжения** δU понимают разность между действительным U и номинальным $U_{\text{ном}}$ значениями напряжения для данной сети:

$$\left. \begin{aligned} \delta U &= U - U_{\text{ном}} \text{ (В, кВ);} \\ \delta U &= \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \% . \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Действительное значение напряжения в электрических сетях однофазного тока определяют как действующее значение напряжения основной частоты $U_{(1)}$ без учета гармонических составляющих, в сетях трехфазного тока – как действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты $U_{1(1)}$.



Согласно **ГОСТ 13109-97**, отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения напряжения, для которого установлены следующие нормы:

- **нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения δU_y** на выводах приемников электрической энергии равны соответственно **± 5 и $\pm 10\%$** от номинального напряжения электрической сети;
- нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения **в точках общего присоединения потребителей электрической энергии к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ и более** должны быть установлены в договорах на пользование электрической энергией между энергоснабжающей организацией и потребителем с учетом необходимости выполнения норм настоящего стандарта на выводах приемников электрической энергии.



Оценка соответствия показателей КЭ указанным нормам проводится в течение расчетного периода, равного 24 ч.

Наибольшие и наименьшие значения установившегося отклонения напряжения, определяемые с учетом знака в течение расчетного периода времени, должны находиться в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями,

а верхнее и нижнее значения этих показателей КЭ, являющиеся границами интервала, в котором с вероятностью 95% находятся измеренные значения установившегося отклонения напряжения, должны находиться в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями.



Рекомендации на основе ГОСТ

В условиях нормальной работы приемников электроэнергии отклонения напряжения от номинального значения допускаются в следующих пределах:

- -5...+10 % на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления;
- -2,5...+5 % на зажимах приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения;
- на зажимах остальных приемников электроэнергии допускается отклонение напряжения в пределах ± 5 % номинального.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 %.



Согласно **ГОСТ 32144-2013**, для отклонения напряжения установлены следующие нормы:

- положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Установленные нормы медленных изменений напряжения электропитания относятся к 1008 интервалам времени измерений по 10 минут каждый (итого 168 ч или 7 суток).

$$\delta U_{(-)} = \left[\left(U_0 - U_{m(-)} \right) / U_0 \right] \cdot 100;$$

$U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин

$$\delta U_{(+)} = \left[\left(U_{m(+)} - U_0 \right) / U_0 \right] \cdot 100,$$

U_0 — напряжение, равное стандартному номинальному напряжению U_{nom}

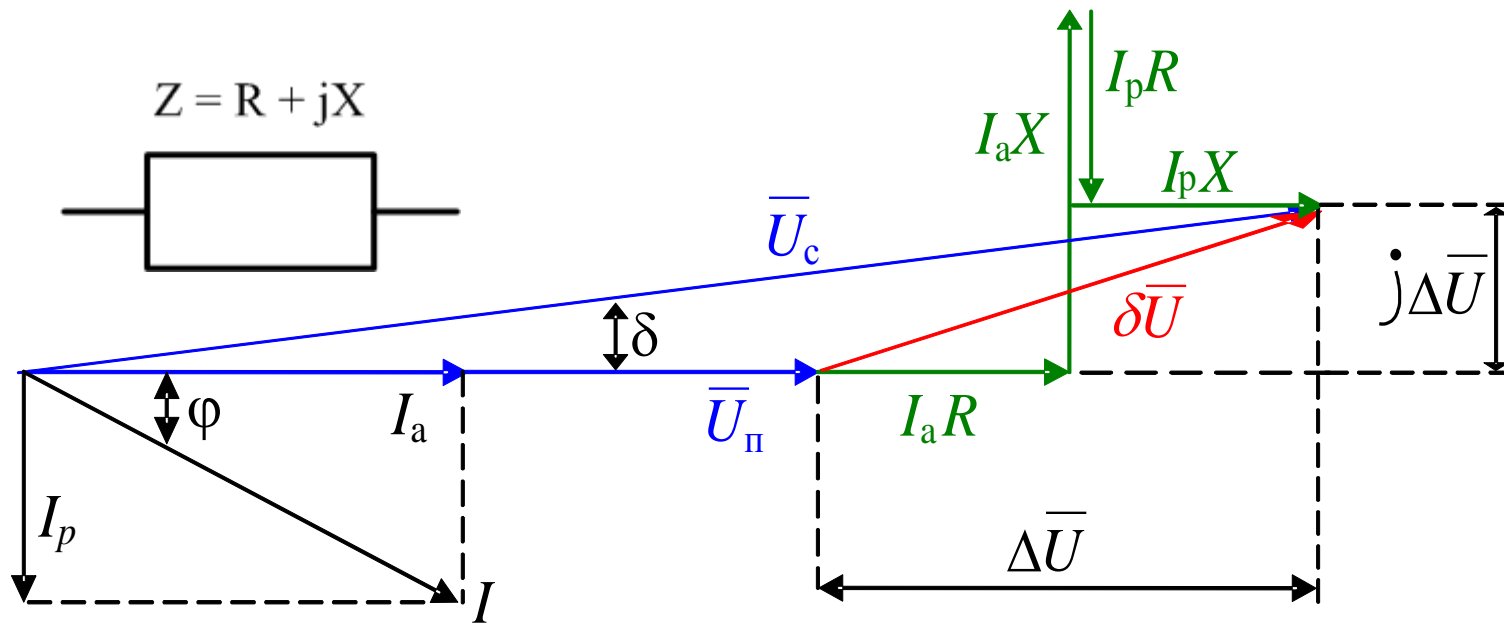


Рисунок - Векторная диаграмма напряжений для простейшей электрической сети.



Для определения пределов регулирования напряжения составляются **эпюры напряжений вдоль сети для различных режимов нагрузки**. Кроме того, эпюры позволяют провести проверку выбранного сечения проводников при расчете и проектировании системы электроснабжения.

Эпюра наглядно изображает отклонения напряжения в процентах вдоль сети от центра питания ЦП до электроприемников. Потери напряжения в линиях изображаются наклонными линиями. В трансформаторах имеются потери напряжения, зависящие от нагрузки и коэффициента мощности, и повышения напряжения, зависящие от выбранной степени трансформации при схеме ПБВ. Эпюра составляется для максимальной, минимальной и послеаварийной нагрузок и дает соответствующие предельные отклонения напряжения. Для практических расчетов удобнее пользоваться таблицами.





Расчет цеховой сети по условиям допустимой потери напряжения и построение эпюры отклонения напряжения выполняется для цепочки линий от шин ГПП или ЦРП до зажимов одного наиболее удаленного от цеховой ТП или наиболее мощного ЭП для режимов максимальных и минимальных нагрузок (определяется из суточного графика нагрузок), а в случае двухтрансформаторной подстанции – и послеаварийного.



Отклонение напряжения (от U_n) в любой точке сети рассчитывается по выражению:

$$V = V_{\text{цп}} \% + \delta U_{\text{т}} \% - \sum \Delta U \%,$$

где $V_{\text{цп}}$ – отклонение напряжения в центре питания, которое равно +5 % U_n в режиме максимальных нагрузок и U_n в режиме минимальных нагрузок сети;

$\delta U_{\text{т}}$ – «добавка», создаваемая цеховым трансформатором;

ΔU – сумма потерь напряжения до какой-либо точки сети, начиная с центра питания (ГПП)

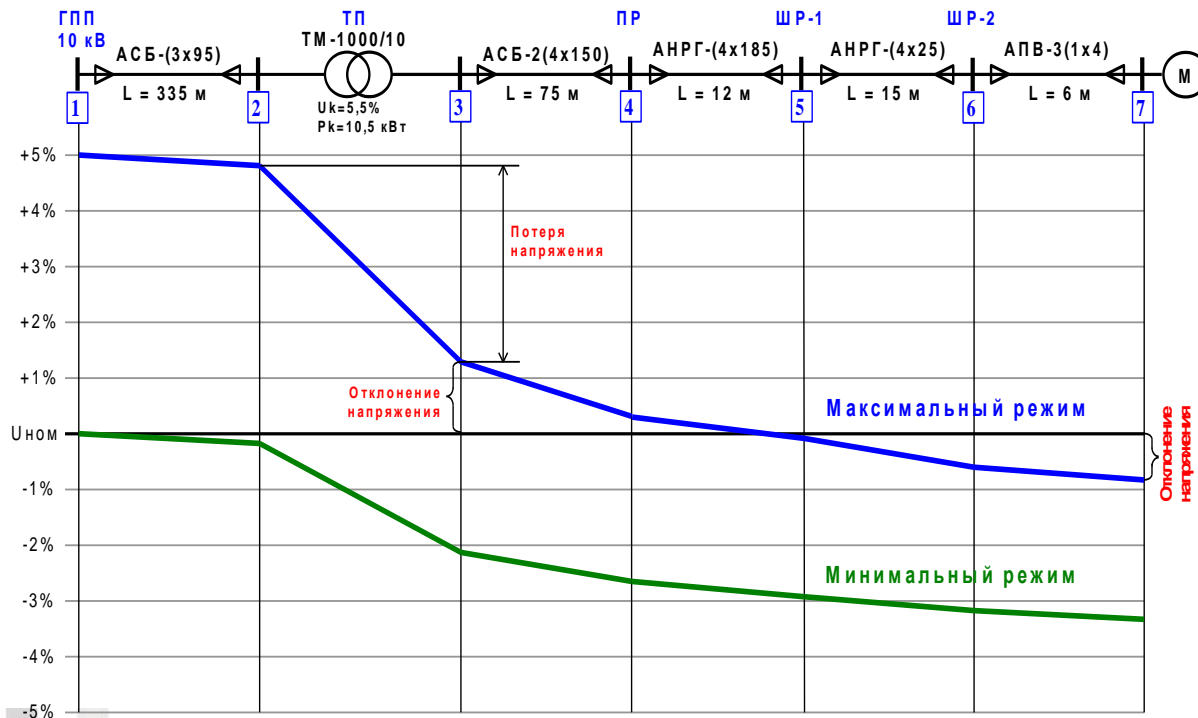
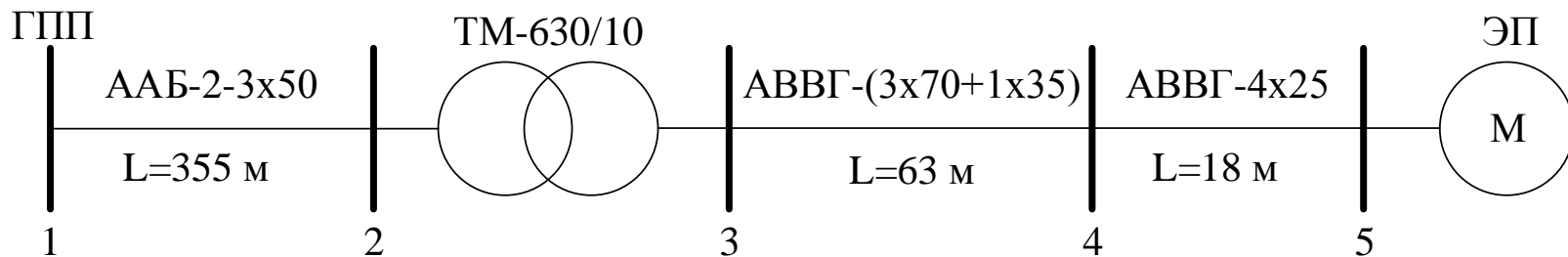


Рисунок - Эпюры отклонений напряжения



| | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 |
|---|-------|-------|-----|-----|
| Мощность, проходящая по участку в максимальном режиме, кВт и кВАр | 406 | 406 | 95 | 55 |
| | 208 | 208 | 32 | 18 |
| Мощность, проходящая по участку в минимальном режиме, кВт и кВАр | 101,5 | 101,5 | 55 | 55 |
| | 83,2 | 83,2 | 18 | 18 |
| Мощность, проходящая по участку в послеаварийном режиме, кВт и кВАр | 812 | 812 | 95 | 55 |
| | 516 | 516 | 32 | 18 |



Для трансформаторов:

$$\Delta U_{\text{т\%}} = \beta_{\text{т}} \cdot (U_{\text{а}} \cdot \cos\varphi_2 + U_{\text{р}} \cdot \sin\varphi_2) + \frac{\beta_{\text{т}}^2}{200} \cdot (U_{\text{а}} \cdot \sin\varphi_2 - U_{\text{р}} \cdot \cos\varphi_2),$$

где $\beta_{\text{т}} = \frac{S_{\text{р}}}{S_{\text{н}}}$ - отношение фактической нагрузки одного трансформатора к номинальной в рассматриваемом режиме работы;

$S_{\text{р}}$ - поток мощности, передаваемый через цеховой трансформатор, кВА;

$U_{\text{а}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot 100\%}{S_{\text{ном.тр}}}$ - активная составляющая напряжения короткого

замыкания трансформатора КТП, % ($\Delta P_{\text{кз}}$ - потери активной мощности, кВт (паспортные данные));

$U_{\text{р}} = \sqrt{(U_{\text{кз}})^2 - (U_{\text{а}})^2}$ - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания цехового трансформатора, % ($\Delta U_{\text{кз}}$ - напряжение короткого замыкания, % (паспортные данные));



$\cos\varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{P - \Delta P_T}{\sqrt{(P - \Delta P_T)^2 + (Q - \Delta Q_T)^2}}$ - коэффициент мощности для вторичной нагрузки цехового трансформатора, о.е. (P – поток активной мощности, передаваемой через цеховой трансформатор, кВт; Q – поток реактивной мощности, передаваемой через цеховой трансформатор, кВАр; $\Delta P = 0,02S$ – потери активной мощности, в цеховом трансформаторе, кВт; $\Delta Q = 0,1S$ – потери реактивной мощности, в цеховом трансформаторе, кВАр);

$\sin\varphi_2$ – определяется через $\cos\varphi_2$ по тригонометрическим формулам;

Также можно определить их:

$$\cos\varphi_2 = \frac{P_p}{S_p} \text{ и } \sin\varphi_2 = \frac{Q_p}{S_p}$$



Для линий:

$$\Delta U_{\text{л}\%} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{10 \cdot U^2}$$

где R и X – активное и индуктивное сопротивления участка линии, Ом;

U – напряжение на данном участке цепи (в начале участка), кВ;

ΔU – отклонение напряжения на соответствующем участке цепи, %;

P – поток активной мощности, передаваемый по соответствующему участку цепи, кВт;

Q – поток реактивной мощности, передаваемый по соответствующему участку цепи, кВАр.



| Сечение жилы, мм ² | Активное сопротивление при 20 °С, Ом/км, жилы | | Индуктивное сопротивление, Ом/км, кабеля напряжением, кВ | | | |
|-------------------------------|---|--------|--|-------|-------|-------|
| | алюминиевой | медной | 1 | 6 | 10 | 20 |
| 10 | 2,94 | 1,79 | 0,073 | 0,11 | 0,122 | |
| 16 | 1,84 | 1,12 | 0,068 | 0,102 | 0,113 | — |
| 25 | 1,17 | 0,72 | 0,066 | 0,091 | 0,099 | 0,135 |
| 35 | 0,84 | 0,51 | 0,064 | 0,087 | 0,095 | 0,129 |
| 50 | 0,59 | 0,36 | 0,063 | 0,083 | 0,09 | 0,119 |
| 70 | 0,42 | 0,256 | 0,061 | 0,08 | 0,086 | 0,116 |
| 95 | 0,31 | 0,19 | 0,06 | 0,078 | 0,083 | 0,110 |
| 120 | 0,24 | 0,15 | 0,06 | 0,076 | 0,081 | 0,107 |
| 150 | 0,2 | 0,12 | 0,059 | 0,074 | 0,079 | 0,104 |
| 185 | 0,16 | 0,1 | 0,059 | 0,073 | 0,077 | 0,101 |
| 240 | 0,12 | 0,07 | 0,058 | 0,071 | 0,075 | — |

Приложение П20

Полное сопротивление цепи фаза — нуль с учетом алюминиевой оболочки четырехжильных кабелей с бумажной изоляцией по [5], Ом/км

| Число и сечение жил, мм ² | Полное сопротивление z_p , Ом/км, для кабелей | |
|--------------------------------------|---|----------------------|
| | медных АГ, АБ | алюминиевых ААГ, ААБ |
| 3×6+1×4 | 4,74 | 7,49 |
| 3×10+1×6 | 3,06 | 4,73 |
| 3×16+1×10 | 2,01 | 3,08 |
| 3×25+1×16 | 1,38 | 2,10 |
| 3×35+1×16 | 1,06 | 1,57 |
| 3×50+1×25 | 0,78 | 1,16 |
| 3×70+1×25 | 0,61 | 0,87 |
| 3×95+1×25 | 0,48 | 0,69 |
| 3×120+1×35 | 0,41 | 0,58 |
| 3×150+1×50 | 0,31 | 0,45 |
| 3×185+1×50 | 0,27 | 0,37 |



Значения сопротивлений кабелей напряжением 1 кВ

| Сечение жилы, мм ² | Активное сопротивление при 20 °С жилы, мОм/м | | Индуктивное сопротивление, мОм/м | |
|----------------------------------|---|--------|---|---|
| | алюминиевой | медной | кабеля с поясной бумажной изоляцией | трех проводов в трубе, кабеля с резиновой или поливинилхло- ридной изоляцией |
| 1 | – | 18,5 | – | 0,133 |
| 1,5 | – | 12,3 | – | 0,126 |
| 2,5 | 12,5 | 7,4 | 0,104 | 0,116 |
| 4 | 7,81 | 4,63 | 0,095 | 0,107 |
| 6 | 5,21 | 3,09 | 0,090 | 0,100 |
| 10 | 3,12 | 1,84 | 0,073 | 0,099 |
| 16 | 1,95 | 1,16 | 0,0675 | 0,095 |
| 25 | 1,25 | 0,74 | 0,0662 | 0,091 |
| 35 | 0,894 | 0,53 | 0,0637 | 0,088 |
| 50 | 0,625 | 0,37 | 0,0625 | 0,085 |
| 70 | 0,447 | 0,265 | 0,0612 | 0,082 |
| 95 | 0,329 | 0,195 | 0,0602 | 0,081 |
| 120 | 0,261 | 0,154 | 0,0602 | 0,080 |
| 150 | 0,208 | 0,124 | 0,0596 | 0,079 |
| 185 | 0,169 | 0,100 | 0,0596 | 0,078 |
| 240 | 0,130 | 0,077 | 0,0587 | 0,077 |



Расчетные данные кабелей с бумажной изоляцией (на 1 км)

| Сече- ние жилы, мм ² | r_o , Ом | | 6 кВ | | 10 кВ | | 20 кВ | | 35 кВ | |
|--|------------|---------------|---------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Медь | Алю- миний | x_o , Ом | b_o , квар | x_o , Ом | b_o , квар | x_o , Ом | b_o , квар | x_o , Ом | b_o , квар |
| 10 | 1,84 | 3,10 | 0,110 | 2,3 | — | — | — | — | — | — |
| 16 | 1,15 | 1,94 | 0,102 | 2,6 | 0,113 | 5,9 | — | — | — | — |
| 25 | 0,74 | 1,24 | 0,091 | 4,1 | 0,099 | 8,6 | 0,135 | 24,8 | — | — |
| 35 | 0,52 | 0,89 | 0,087 | 4,6 | 0,095 | 10,7 | 0,129 | 27,6 | — | — |
| 50 | 0,37 | 0,62 | 0,083 | 5,2 | 0,090 | 11,7 | 0,119 | 31,8 | — | — |
| 70 | 0,26 | 0,443 | 0,08 | 6,6 | 0,086 | 13,5 | 0,116 | 35,9 | 0,137 | 86 |
| 95 | 0,194 | 0,326 | 0,078 | 8,7 | 0,083 | 15,6 | 0,110 | 40,0 | 0,126 | 95 |
| 120 | 0,153 | 0,258 | 0,076 | 9,5 | 0,081 | 16,9 | 0,107 | 42,8 | 0,120 | 99 |
| 150 | 0,122 | 0,206 | 0,074 | 10,4 | 0,079 | 18,3 | 0,104 | 47,0 | 0,116 | 112 |
| 185 | 0,099 | 0,167 | 0,073 | 11,7 | 0,077 | 20,0 | 0,101 | 51,0 | 0,113 | 115 |
| 240 | 0,77 | 0,129 | 0,071 | 13,0 | 0,075 | 21,5 | 0,098 | 52,8 | 0,111 | 119 |
| 300 | 0,061 | 0,103 | — | — | — | — | 0,095 | 57,6 | 0,097 | 127 |
| 400 | 0,046 | 0,077 | — | — | — | — | 0,092 | 64,0 | — | — |



Трансформаторы трехфазные силовые общего назначения двухобмоточные
с охлаждением естественным масляным (М)

| Тип | $U_k, \%$ | Потери, кВт | | $I_0, \%$ |
|------------|-----------|-------------|-------|-----------|
| | | P_x | P_k | |
| ТМ-25/10 | 4,5 | 0,125 | 0,600 | 3,2 |
| ТМ-40/10 | 4,5 | 0,180 | 0,880 | 3,0 |
| ТМ-63/10 | 4,5 | 0,265 | 1,280 | 2,8 |
| ТМ-100/10 | 4,5 | 0,365 | 1,970 | 2,6 |
| ТМ-160/10 | 4,5 | 0,540 | 2,650 | 2,4 |
| ТМ-250/10 | 4,5 | 0,780 | 3,700 | 2,3 |
| ТМ-400/10 | 4,5 | 1,080 | 5,500 | 2,1 |
| ТМ-630/10 | 5,5 | 1,680 | 7,600 | 2,0 |
| ТМ-1000/10 | 5,5 | 2,450 | 12,20 | 1,4 |
| ТМ-1600/10 | 5,5 | 3,300 | 18,00 | 1,3 |
| ТМ-2500/10 | 5,5 | 4,600 | 25,00 | 1,0 |
| ТМ-4000/10 | 6,5 | 6,400 | 33,50 | 0,9 |
| ТМ-6300/10 | 6,5 | 9,000 | 46,50 | 0,8 |



Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4
кВ

| Номи- нальная мощность, кВ·А | Схема соеди- нения обмоток | Значение сопротивлений, мОм | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------|-------------------------------|----------|------------------------|-------------|
| | | прямой последовательности | | нулевой последовательности | | току однофазного КЗ | |
| | | R_{1T} | X_{1T} | R_{0T} | X_{0T} | $R_T^{(1)}$ | $X_T^{(1)}$ |
| 25 | У/У _н | 154 | 244 | 1650 | 1930 | 1958 | 2418 |
| 40 | У/У _н | 88 | 157 | 952 | 1269 | 1128 | 1583 |
| 63 | У/У _н | 52 | 102 | 504 | 873 | 608 | 1077 |
| 100 | У/У _н | 31,5 | 65 | 254 | 582 | 317 | 712 |
| 160 | У/У _н | 16,6 | 41,7 | 151 | 367 | 184 | 450 |
| 250 | У/У _н | 9,4 | 27,2 | 96,5 | 235 | 115 | 289 |
| 400 | У/У _н | 5,5 | 17,1 | 55,6 | 149 | 66,6 | 183 |
| 630 | У/У _н | 3,1 | 13,6 | 30,2 | 95,8 | 36,4 | 123 |
| 1000 | У/У _н | 1,7 | 8,6 | 19,6 | 60,6 | 2,3 | 77,8 |
| 1600 | У/У _н | 1 | 5,4 | 16,3 | 50 | 18,3 | 60,8 |
| 2500 | Д/У _н | 0,64 | 3,46 | 0,64 | 3,46 | 1,92 | 10,38 |



Участок 1-2:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} \cdot X_{12}}{10 \cdot U_1^2}$$

$$R_{12} = \frac{r_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,59 \cdot 0,355}{2} = 0,105 \text{ Ом}$$

$$X_{12} = \frac{x_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,09 \cdot 0,355}{2} = 0,016 \text{ Ом}$$

$$P_{12} = 406 \text{ кВт}, Q_{12} = 208 \text{ кВАр}, \quad U_1 = 1,05 \cdot U_{\text{ном}} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{12} = \frac{406 \cdot 0,105 + 208 \cdot 0,016}{10 \cdot 10,5^2} = 0,0415 \%$$

$$\Delta U_{12} = 0,0415 \cdot \frac{10500}{100} = 4,36 \text{ В}$$

$$U_2 = 10500 - 4,36 = 10495,64 \text{ В}$$



Участок 2-3:

$$\Delta U_{23} = \beta_T \cdot (U_a \cdot \cos\varphi_2 + U_p \cdot \sin\varphi_2) + \frac{\beta_T^2}{200} \cdot (U_a \cdot \sin\varphi_2 - U_p \cdot \cos\varphi_2)$$

$$\beta_T = \frac{S_p}{S_H} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{S_H} = \frac{\sqrt{406^2 + 208^2}}{630} = 0,724$$

$$U_a = \frac{\Delta P_{K3} \cdot 100\%}{S_H} = \frac{7,6 \cdot 100\%}{630} = 1,206 \%$$

$$U_p = \sqrt{U_{K3}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,2^2} = 5,366 \%$$

$$\Delta P_T = P_{xx} + \beta_T^2 \cdot P_{K3} = 1,68 + 0,724^2 \cdot 7,6 = 5,66 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = S_H \cdot \frac{I_{xx}}{100} + \beta_T^2 \cdot S_H \cdot \frac{U_{K3}}{100} = \Delta Q_T =$$

$$= 630 \cdot \frac{2}{100} + 0,724^2 \cdot 630 \cdot \frac{5,5}{100} = 30,76 \text{ кВАр}$$



$$P'_2 = P_{23} - \Delta P_T = 406 - 5,66 = 400,34 \text{ кВт}$$

$$Q'_2 = Q_{23} - \Delta Q_T = 208 - 30,76 = 177,24 \text{ кВар}$$

$$S'_2 = \sqrt{P'^2_2 + Q'^2_2} = \sqrt{400,34^2 + 177,24^2} = 435,81 \text{ кВА}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P'_2}{S'_2} = \frac{400,34}{435,81} = 0,918 \quad \sin \varphi_2 = \frac{Q'_2}{S'_2} = \frac{177,24}{435,81} = 0,406$$

$$\Delta U_{23} = 0,72 \cdot (1,2 \cdot 0,92 + 5,3 \cdot 0,4) + \frac{0,72^2}{200} \cdot (1,2 \cdot 0,4 - 5,3 \cdot 0,92) = 2,31 \%$$

$$\Delta U_{23} = 2,31 \cdot \frac{10495,64}{100} = 242,43 \text{ В}$$

$$U_{2BH} = 10495,64 - 242,43 = 10253,21 \text{ В}$$

$$U_{2HH} = U_3 = 400 \cdot \frac{10253,21}{10000} = 410,12 \text{ В}$$



Участок 3-4:

$$\Delta U_{34} = \frac{P_{34} \cdot R_{34} + Q_{34} \cdot X_{34}}{10 \cdot U_3^2}$$

$$R_{34} = \frac{r_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,447 \cdot 0,063}{1} = 0,028 \text{ Ом}$$

$$X_{34} = \frac{x_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,082 \cdot 0,063}{1} = 0,005 \text{ Ом}$$

$$P_{34} = 95 \text{ кВт}, \quad Q_{34} = 32 \text{ кВАр}, \quad U_3 = 409,9 \text{ В}$$

$$\Delta U_{34} = \frac{95 \cdot 0,028 + 32 \cdot 0,005}{10 \cdot 0,4099^2} = 1,678 \%$$

$$\Delta U_{34} = 1,678 \cdot \frac{410,12}{100} = 6,88 \text{ В}$$

$$U_4 = 409,9 - 6,88 = 403 \text{ В}$$



Участок 4-5:

$$\Delta U_{45} = \frac{P_{45} \cdot R_{45} + Q_{45} \cdot X_{45}}{10 \cdot U_4^2}$$

$$R_{45} = \frac{r_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{1,25 \cdot 0,018}{1} = 0,022 \text{ Ом}$$

$$X_{45} = \frac{x_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{0,091 \cdot 0,018}{1} = 0,002 \text{ Ом}$$

$$P_{45} = 55 \text{ кВт}, \quad Q_{45} = 18 \text{ кВАр}, \quad U_4 = 403 \text{ В}$$

$$\Delta U_{45} = \frac{55 \cdot 0,022 + 18 \cdot 0,002}{10 \cdot 0,403^2} = 0,767 \%$$

$$\Delta U_{45} = 0,767 \cdot \frac{403}{100} = 3,1 \text{ В}$$

$$U_5 = 403 - 3,1 = 399,9 \text{ В}$$



Участок 1-2:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} \cdot X_{12}}{10 \cdot U_1^2}$$

$$R_{12} = \frac{r_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,62 \cdot 0,355}{2} = 0,11 \text{ Ом}$$

$$X_{12} = \frac{x_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,09 \cdot 0,355}{2} = 0,016 \text{ Ом}$$

$$P_{12} = 101,5 \text{ кВт}, \quad Q_{12} = 83,2 \text{ кВАр},$$

$$U_1 = U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{12} = \frac{101,5 \cdot 0,11 + 83,2 \cdot 0,016}{10 \cdot 10^2} = 0,0125 \%$$

$$\Delta U_{12} = 0,013 \cdot \frac{10000}{100} = 1,25 \text{ В} \quad U_2 = 10000 - 1,25 = 9998,75 \text{ В}$$



Участок 2-3:

$$\Delta U_{23} = \beta_T \cdot (U_a \cdot \cos\varphi_2 + U_p \cdot \sin\varphi_2) + \frac{\beta_T^2}{200} \cdot (U_a \cdot \sin\varphi_2 - U_p \cdot \cos\varphi_2)$$

$$\beta_T = \frac{S_p}{S_H} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{S_H} = \frac{\sqrt{101,5^2 + 83,2^2}}{630} = 0,208$$

$$U_a = \frac{\Delta P_{K3} \cdot S_H}{S_H} = \frac{7,6 \cdot 100\%}{630} = 1,206 \%$$

$$U_p = \sqrt{U_{K3}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,2^2} = 5,366 \%$$

$$\Delta P_T = P_{xx} + \beta_T^2 \cdot P_{K3} = 1,68 + 0,208^2 \cdot 7,6 = 2 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = S_H \cdot \frac{I_{xx}}{100} + \beta_T^2 \cdot S_H \cdot \frac{U_{K3}}{100} = \Delta Q_T =$$

$$= 630 \cdot \frac{2}{100} + 0,208^2 \cdot 630 \cdot \frac{5,5}{100} = 14,1 \text{ кВАр}$$



$$P'_2 = P_{23} - \Delta P_T = 101,5 - 2 = 99,5 \text{ кВт}$$

$$Q'_2 = Q_{23} - \Delta Q_T = 83,2 - 14,1 = 69,1 \text{ кВАр}$$

$$S'_2 = \sqrt{P_2'^2 + Q_2'^2} = \sqrt{99,5^2 + 69,1^2} = 121,14 \text{ кВА}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P'_2}{S'_2} = \frac{99,5}{121,14} = 0,821 \quad \sin \varphi_2 = \frac{Q'_2}{S'_2} = \frac{69,1}{121,14} = 0,57$$

$$\Delta U_{23} = 0,2 \cdot (1,2 \cdot 0,82 + 5,3 \cdot 0,57) + \frac{0,2^2}{200} \cdot (1,2 \cdot 0,57 - 5,3 \cdot 0,82) = 0,8 \%$$

$$\Delta U_{23} = 0,8 \cdot \frac{9998,75}{100} = 80 \text{ В}$$

$$U_{2\text{BH}} = 9998,75 - 80 = 9918,75 \text{ В}$$

$$U_{2\text{HH}} = U_3 = 400 \cdot \frac{9918,75}{10000} = 396,75 \text{ В}$$



Участок 3-4:

$$\Delta U_{34} = \frac{P_{34} \cdot R_{34} + Q_{34} \cdot X_{34}}{10 \cdot U_3^2}$$

$$R_{34} = \frac{r_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,447 \cdot 0,063}{1} = 0,028 \text{ Ом}$$

$$X_{34} = \frac{x_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,082 \cdot 0,063}{1} = 0,005 \text{ Ом}$$

$$P_{34} = 55 \text{ кВт}, \quad Q_{34} = 18 \text{ кВАр}, \quad U_3 = 396,6 \text{ В}$$

$$\Delta U_{34} = \frac{55 \cdot 0,028 + 18 \cdot 0,005}{10 \cdot 0,3966^2} = 1,036 \%$$

$$\Delta U_{34} = 1,036 \cdot \frac{396,75}{100} = 4,1 \text{ В}$$

$$U_4 = 396,6 - 4,1 = 392,5 \text{ В}$$



Участок 4-5:

$$\Delta U_{45} = \frac{P_{45} \cdot R_{45} + Q_{45} \cdot X_{45}}{10 \cdot U_4^2}$$

$$R_{45} = \frac{r_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{1,25 \cdot 0,018}{1} = 0,022 \text{ Ом}$$

$$X_{45} = \frac{x_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{0,091 \cdot 0,018}{1} = 0,002 \text{ Ом}$$

$$P_{45} = 55 \text{ кВт}, \quad Q_{45} = 18 \text{ кВАр}, \quad U_4 = 392,5 \text{ В}$$

$$\Delta U_{45} = \frac{55 \cdot 0,022 + 18 \cdot 0,002}{10 \cdot 0,3925^2} = 0,809 \%$$

$$\Delta U_{45} = 0,809 \cdot \frac{392,5}{100} = 3,17 \text{ В}$$

$$U_5 = 392,5 - 3,17 = 389,33 \text{ В}$$



Участок 1-2:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} \cdot X_{12}}{10 \cdot U_1^2}$$

$$R_{12} = \frac{r_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,62 \cdot 0,355}{2} = 0,11 \text{ Ом}$$

$$X_{12} = \frac{x_{12} \cdot l_{12}}{n} = \frac{0,09 \cdot 0,355}{2} = 0,016 \text{ Ом}$$

$$P_{12} = 2 \cdot P_{max} = 2 \cdot 406 = 812 \text{ кВт}, \quad Q_{12} = 2 \cdot Q_{max} = 2 \cdot 208 = 516 \text{ кВАр},$$

$$U_1 = 1,05 \cdot U_{ном} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{12} = \frac{812 \cdot 0,11 + 516 \cdot 0,016}{10 \cdot 10,5^2} = 0,088 \%$$

$$\Delta U_{12} = 0,088 \cdot \frac{10500}{100} = 9,29 \text{ В} \quad U_2 = 10500 - 9,29 = 10400,71 \text{ В}_{32}$$



Участок 2-3:

$$\Delta U_{23} = \beta_T \cdot (U_a \cdot \cos\varphi_2 + U_p \cdot \sin\varphi_2) + \frac{\beta_T^2}{200} \cdot (U_a \cdot \sin\varphi_2 - U_p \cdot \cos\varphi_2)$$

$$\beta_T = \frac{S_p}{S_H} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{S_H} = \frac{\sqrt{812^2 + 516^2}}{630} = 1,527$$

$$U_a = \frac{\Delta P_{K3} \cdot 100\%}{S_H} = \frac{7,6 \cdot 100\%}{630} = 1,206 \%$$

$$U_p = \sqrt{U_{K3}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,2^2} = 5,366 \%$$

$$\Delta P_T = P_{xx} + \beta_T^2 \cdot P_{K3} = 1,68 + 1,527^2 \cdot 7,6 = 19,4 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = S_H \cdot \frac{I_{xx}}{100} + \beta_T^2 \cdot S_H \cdot \frac{U_{K3}}{100} = \Delta Q_T =$$

$$= 630 \cdot \frac{2}{100} + 1,527^2 \cdot 630 \cdot \frac{5,5}{100} = 93,4 \text{ кВАр}$$



$$P'_2 = P_{23} - \Delta P_T = 812 - 19,4 = 792,6 \text{ кВт}$$

$$Q'_2 = Q_{23} - \Delta Q_T = 516 - 93,4 = 422,6 \text{ кВАр}$$

$$S'_2 = \sqrt{P'^2_2 + Q'^2_2} = \sqrt{792,6^2 + 422,6^2} = 898,22 \text{ кВА}$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{P'_2}{S'_2} = \frac{792,6}{898,22} = 0,882 \quad \sin\varphi_2 = \frac{Q'_2}{S'_2} = \frac{422,6}{898,22} = 0,47$$

$$\Delta U_{23} = 1,527 \cdot (1,2 \cdot 0,882 + 5,3 \cdot 0,47) + \frac{1,527^2}{200} \cdot (1,2 \cdot 0,47 - 5,3 \cdot 0,882) =$$
$$= 5,37 \%$$

$$\Delta U_{23} = 5,37 \cdot \frac{10400,71}{100} = 558,71 \text{ В}$$

$$U_{2BH} = 10400,71 - 558,71 = 9842 \text{ В}$$

$$U_{2HH} = U_3 = 400 \cdot \frac{9842}{10000} = 393,7 \text{ В}$$



Участок 3-4:

$$\Delta U_{34} = \frac{P_{34} \cdot R_{34} + Q_{34} \cdot X_{34}}{10 \cdot U_3^2}$$

$$R_{34} = \frac{r_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,447 \cdot 0,063}{1} = 0,028 \text{ Ом}$$

$$X_{34} = \frac{x_{34} \cdot l_{34}}{n} = \frac{0,082 \cdot 0,063}{1} = 0,005 \text{ Ом}$$

$$P_{34} = 95 \text{ кВт}, \quad Q_{34} = 32 \text{ кВар}, \quad U_3 = 393,4 \text{ В}$$

$$\Delta U_{34} = \frac{95 \cdot 0,028 + 32 \cdot 0,005}{10 \cdot 0,3934^2} = 1,822 \%$$

$$\Delta U_{34} = 1,822 \cdot \frac{393,7}{100} = 7,17 \text{ В}$$

$$U_4 = 393,2 - 7,17 = 386,03 \text{ В}$$



Участок 4-5:

$$\Delta U_{45} = \frac{P_{45} \cdot R_{45} + Q_{45} \cdot X_{45}}{10 \cdot U_4^2}$$

$$R_{45} = \frac{r_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{1,25 \cdot 0,018}{1} = 0,022 \text{ Ом}$$

$$X_{45} = \frac{x_{45} \cdot l_{45}}{n} = \frac{0,091 \cdot 0,018}{1} = 0,002 \text{ Ом}$$

$$P_{45} = 55 \text{ кВт}, \quad Q_{45} = 18 \text{ кВАр}, \quad U_4 = 836,24 \text{ В}$$

$$\Delta U_{45} = \frac{55 \cdot 0,022 + 18 \cdot 0,002}{10 \cdot 0,38624^2} = 0,835 \%$$

$$\Delta U_{45} = 0,835 \cdot \frac{386,03}{100} = 3,22 \text{ В}$$

$$U_5 = 386,04 - 3,22 = 382,82 \text{ В}$$



Максимальный режим работы

$$\delta U_1 = 5 \%$$

$$\delta U_2 = \delta U_1 - \Delta U_{12} = 5 - 0,0415 = 4,9585 \%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \Delta U_{23} = 4,9585 - 2,31 = 2,6485 \%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \Delta U_{34} = 2,6485 - 1,678 = 0,9705 \%$$

$$\delta U_5 = \delta U_4 - \Delta U_{45} = 0,9705 - 0,767 = 0,2035 \%$$



Минимальный режим работы

$$\delta U_1 = 0 \%$$

$$\delta U_2 = \delta U_2 - \Delta U_{12} = 0 - 0,0125 = -0,0125 \%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \Delta U_{23} = -0,0125 - 0,8 = -0,8125 \%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \Delta U_{34} = -0,8125 - 1,036 = -1,8485 \%$$

$$\delta U_5 = \delta U_4 - \Delta U_{45} = -1,8485 - 0,809 = -2,6575 \%$$



Послеаварийный режим работы

$$\delta U_1 = 5 - 10 \%$$

$$\delta U_2 = \delta U_1 - \Delta U_{12} = 5 - 0,088 = 4,912 \%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \Delta U_{23} = 4,9125 - 5,37 = -0,4575 \%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \Delta U_{34} = -0,4575 - 1,822 = -2,2795 \%$$

$$\delta U_5 = \delta U_4 - \Delta U_{45} = -2,2795 - 0,835 = -3,1145 \%$$



Послеаварийный режим работы

$$\delta U_1 = 5 - 10 \%$$

$$\delta U_2 = \delta U_1 - \Delta U_{12} = 10 - 0,088 = 9,912 \%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \Delta U_{23} = 9,9125 - 5,37 = 4,5425 \%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \Delta U_{34} = 4,5425 - 1,822 = 2,7205 \%$$

$$\delta U_5 = \delta U_4 - \Delta U_{45} = 1,8855 - 0,835 = 1,0505 \%$$

| Участок | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Марка кабеля/ трансформатора | | | | |
| Длина линии, км | | | | |
| Сопротивление линии, Ом активное реактивное | | | | |
| Нагрузка Р+jQ, кВт+кВАр Максимальный Минимальный Послеаварийный | | | | |
| Потеря напряжения, % Максимальный Минимальный Послеаварийный | | | | |
| Отклонение напряжения, % Максимальный Минимальный Послеаварийный | | | | |

| Участок | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 |
|---------------------------------|--------------|-------------|-------------------|--------------|
| Марка кабеля/ трансформатора | ААБл-2(3х50) | ТМ-630/10 | АВВГ-1(3х70+1х35) | АВВГ-1(4х25) |
| Длина линии, км | 0,355 | - | 0,063 | 0,018 |
| Сопротивление линии, Ом | | | | |
| активное | 0,11 | - | 0,028 | 0,022 |
| реактивное | 0,016 | | 0,005 | 0,002 |
| Нагрузка Р+jQ, кВт+кВАр | | | | |
| Максимальный | 406+j208 | 406+j208 | 95+j32 | 55+j18 |
| Минимальный | 101,5+j83,2 | 101,5+j83,2 | 55+j18 | 55+j18 |
| Послеаварийный | 812+j516 | 812+j516 | 985+j32 | 55+j18 |
| Потеря напряжения, % | | | | |
| Максимальный | 0,0435 | 2,367 | 1,678 | 0,767 |
| Минимальный | 0,0125 | 0,834 | 1,036 | 0,809 |
| Послеаварийный | 0,0880 | 5,433 | 1,822 | 0,835 |
| Отклонение напряжения, % | | | | |
| Максимальный | 4,9585 | 2,6485 | 0,9705 | 0,2035 |
| Минимальный | -0,0125 | -0,8125 | -1,8485 | -2,6575 |
| Послеаварийный | 4,912 | -0,4575 | -2,2795 | -3,1145 |

