

Компенсация реактивной мощности

Теоретическая база



К.Т.Н., доцент,
А.В. Беспалов

Задачи компенсации реактивной мощности (КРМ)

- **снижение расходов на электроэнергию;**
- **снижение требований к мощности системы;**
- **улучшение стабильности напряжения;**
- **снижение потерь.**

Способы установки источников реактивной мощности (ИРМ):

- индивидуальный (непосредственно у нагрузок, обычно линейных)
- групповой (на присоединении или на подстанции).



Индивидуальная компенсация реактивной мощности

Централизованная компенсация реактивной мощности

Преимущества индивидуальной установки рядом с нагрузками:

- ✓ предсказуемость; ИРМ не могут создать проблемы в сети при работе без нагрузки;
- ✓ не требуются отдельные выключатели, нагрузка всегда включается вместе с относящимся к нему конденсатором;
- ✓ оптимизация режимов работы нагрузки за счет более эффективного использования электроэнергии и снижения просадок напряжения;
- ✓ нагрузки можно переставлять и переподключать вместе с относящимися к ним конденсаторами;
- ✓ снижение потерь в питающей линии;
- ✓ повышение пропускной способности системы.

Преимущества установки ИРМ на присоединении или на подстанции:

- ✓ экономичность - ниже цена за квар;
- ✓ технологичность — имеются стандартные комплектные установки
- ✓ простота автоматизации при большой единичной мощности - переключение конденсаторов обеспечивает получение строго необходимой реактивной мощности, что исключает перекомпенсацию и связанные с ней перенапряжения.
- ✓ повышение пропускной способности системы.

Метод	Преимущества	Недостатки
Индивидуальные конденсаторы	Наиболее эффективный метод, наибольшая гибкость	Большая стоимость установки и обслуживания
Нерегулируемая батарея	Наиболее экономичное решение, требуется меньше точек установки	Менее гибкое решение, требуются выключатели и/или контакторы
Автоматически регулируемая батарея	Наилучшее решение при меняющихся нагрузках, исключаются перенапряжения, низкая стоимость установки	Выше стоимость оборудования
Комбинированный	Наиболее подходящее решение при большом количестве двигателей	Менее гибкое решение

Изучение особенностей объекта

- ❖ *Мощность нагрузки*
- ❖ *Постоянство нагрузки*
- ❖ *Нагрузочная способность*
- ❖ *Способ начисления платы за электроэнергию*

Баланс реактивной мощности в сети

$$Q_{П_{НБ}} = k_0 \sum_{i=1}^n Q_{НБ_i} + \Delta Q_{T_{\Sigma}} + \sum_{j=1}^m (\Delta Q_j - Q_{C,j})$$

где k_0 – коэффициент одновременности наибольших реактивных нагрузок, $k_0 \approx 0,98$

$Q_{НБ_i}$ – максимальная реактивная нагрузка i го узла

$\Delta Q_{T_{\Sigma}}$ – суммарные потери реактивной мощности в СТ, $\Delta Q_{T_{\Sigma}} \approx 0,1 \cdot S_{max}$

ΔQ_j – потери реактивной мощности в j ой линии

$Q_{C,j}$ – реактивная мощность, генерируемая j ой линией

сеть 110 кВ

сеть 35 кВ

сеть 220 кВ

$$\Delta Q_L = Q_C$$

$$x_0 = 0,41 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$x_0 = 0,42 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$Q_{П_{НБ}} = Q_{Г_{\Sigma}} \text{ баланс}$$

$$q_C = 0,14 \frac{\text{Мвар}}{\text{км}}$$

Если $Q_{П_{НБ}} > Q_{Г_{\Sigma}}$, то

$$Q_{П_{НБ}} > Q_{Г_{\Sigma}}$$

$$Q_{КУ_{\Sigma}} = Q_{П_{НБ}} - Q_{Г_{\Sigma}}$$

Размещение КУ в сети

1. КУ нужно распределять так, чтобы потери мощности в сети были минимальными.
2. В электрических сетях двух уровней напряжения следует в первую очередь устанавливать КУ на шинах НН ПС с более низким номинальным напряжением высокой стороны.
3. В сети с одним уровнем напряжения целесообразно компенсировать реактивную мощность в первую очередь у наиболее электрически удаленных потребителей.
4. При незначительной разнице в электрической удаленности ПС от ИП в сети одного номинального напряжения расстановку КУ следует производить по условию равенства $\operatorname{tg}\varphi$ на шинах НН, исходя из баланса реактивной мощности:

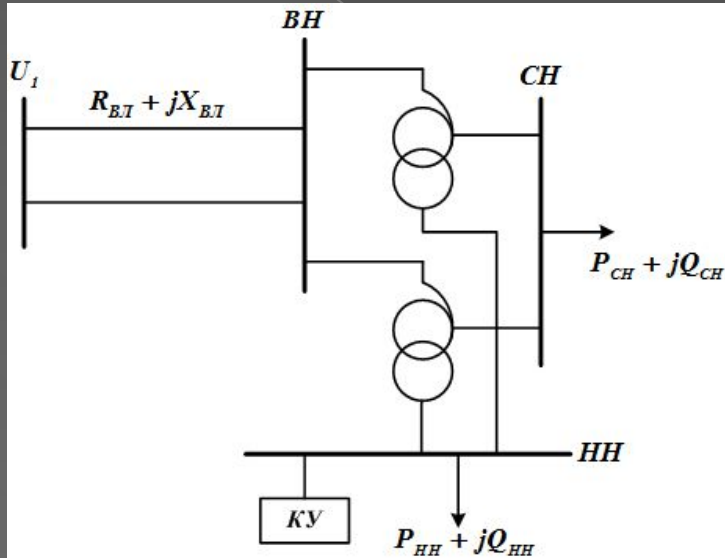
$$\operatorname{tg}\varphi_B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{НБ_i} - Q_{КУ_\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_{НБ_i}}$$

Мощность КУ в каждом узле $Q_{КУ_i} = \operatorname{tg}_{\max_i} (\operatorname{tg} \varphi_i - \varphi_B)$

$$Q_{КУ_{\text{факт}}} = 1,1 \cdot Q_{КУ_i} \quad - \text{ для резервирования}$$

Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

Условие выбора – поддержание желаемого напряжения на сторонах СН и НН



$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

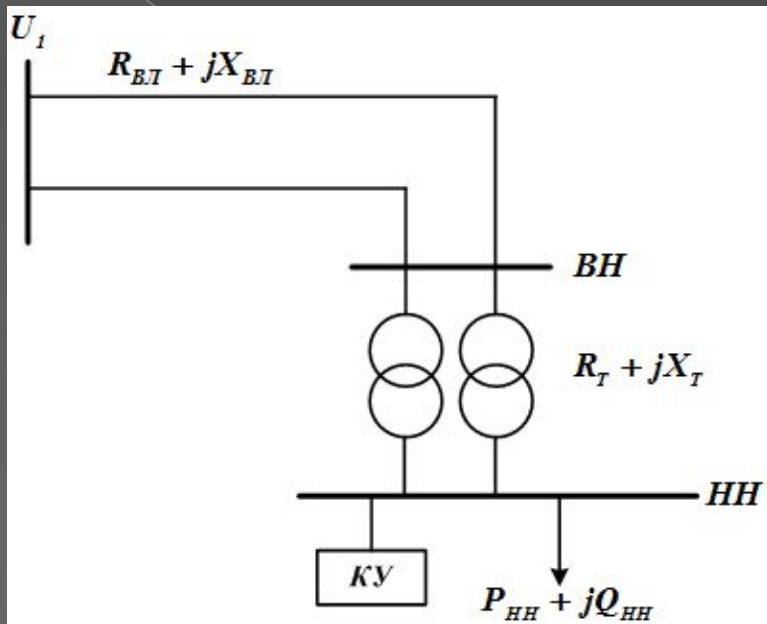
Суммарные потери напряжения в сети

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{(P_{ВН} + P_{НН})(R_{СН} + R_{ТС}) + P_{ТН} R_{НН} + P_{СН} R_{НН} + (Q_{КУ} + Q_{БЛ} - Q_{ТВ})(X_{СН} + X_{ТС}) + Q_{НН} X_{КУ} + (Q_{ТН} - Q) X_{ТВ}}{U_1}$$

Мощность КУ

$$Q_{КУ} = \frac{P_{ВН}(R_{ТВ} + R_{ТС} + R_{НН}) + P_{БЛ}(R_{ТВ} + R_{ТН} + R_{НН}) + Q_{БЛ}(X_{ТВ} + X_{ТС} + X_{НН}) + Q_{БЛ}(X_{ТВ} + X_{ТН} + X_{НН}) - \Delta U_{\Sigma} U}{X_{БЛ} + X_{ТВ} + X_{ТН}}$$

Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ



$$Q_{KY} = Q_{HH} - \frac{\Delta U_{\Sigma} U_{BЛ} - P_{HH} (R_{BЛ} + R_T)}{X_{BЛ} + X_T}$$

$$\Delta U_{CH} = U_1 - U_{CH}^{BЛ} = U_1 - U_{CH} \frac{U_1}{U_{CH_{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{HH} = U_1 - U_{HH}^{BЛ} = U_1 - U_{HH} \frac{U_1}{U_{HH_{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_{CH} + \Delta U_{HH}$$

$$\Delta U_{\Sigma} = 2U_{CH} - U^{жел} \frac{U_1}{U_{HH_{НОМ}}} - U^{жел} \frac{U_1}{U_{НОМ}}$$

Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

Продольная КРМ

1. Потери напряжения в ВЛ без КРМ

$$\Delta U = \frac{PR_{Л} + QX_{Л}}{U}$$

2. Допустимые потери напряжения, кВ

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}} \% U_{\text{ном}}}{100}$$

3. Сопротивление КУ из условия снижения ΔU до $\Delta U_{\text{доп}}$

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{KR_{Л} + Q(X_{Л} - X_{КУ})}{U_{\text{ном}}}$$

4. Ток в линии

$$I_{Л} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}$$

откуда

$$X_{КУ} = \frac{PR_{Л} + QX_{Л} - \Delta U_{\text{доп}} U_{\text{ном}}}{Q}$$

5. Выбор серийно выпускаемого однофазного конденсатора для снижения потерь напряжения

6. Номинальный ток конденсатора

$$I_{K_{\text{ном}}} = \frac{Q_{K_{\text{ном}}}}{U_{K_{\text{ном}}}}$$

7. Число конденсаторов, включенных параллельно в одну фазу
(обеспечение расчетного тока линии)

$$m = \frac{I_{Л}}{I_{K_{\text{ном}}}}$$

Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

Продольная КРМ

8. Сопротивление конденсатора

$$X_{K_{НОМ}} = \frac{U_{K_{НОМ}}}{I_{K_{НОМ}}}$$

9. Число конденсаторов, включенных последовательно в одну фазу (обеспечение $\Delta U_{жел}$)

10. Общее число конденсаторов в УПК

$$n_{\Sigma} = 3 \cdot n \cdot m$$

$$n = \frac{m X_{КУ}}{X_{K_{НОМ}}}$$

11. Установленная мощность УПК

$$Q_{КУ}^{уст} = n_{\Sigma} Q_{K_{НОМ}}$$

12. Номинальное напряжение КУ (УПК)

$$U_{КУ_{НОМ}} = n U_{K_{НОМ}}$$

13. Номинальный ток УПК

$$I_{КУ_{НОМ}} = m I_{K_{НОМ}}$$

14. Фактическое сопротивление КУ

$$X_{КУ_{факт}} = \frac{n X_{K_{НОМ}}}{m}$$

15. Фактические потери напряжения после КРМ

$$\Delta U_{факт} = \frac{RR_{Л} + Q(X_{Л} - X_{КУ_{факт}})}{U_{НОМ_{сети}}}$$

16. Сравнение $\Delta U_{факт}$ с $\Delta U_{доп}$

$$\Delta U_{факт} \leq \Delta U_{доп}$$

Экономическая задача КРМ

$$Z = EK + И \Rightarrow \min$$

Зима

$tg\varphi_3$

Лето

$$Q_{KV_i}^3 = P_{max}^3 (tg\varphi_3 - tg\varphi_3)$$

$$Q_{KV_{факт}}^3 \geq \frac{Q_{KV_i}^3}{N_{с.ш}}$$

$$Q_{KV_i}^L = P_{max}^L (tg\varphi_L - tg\varphi_3)$$

$$Q_{KV_{факт}}^L \geq \frac{Q_{KV_i}^L}{N_{с.ш}}$$

Предельные значения $tg\varphi$

$U_{НОМ}$	$tg\varphi_{ПРЕД}$
110 кВ	0,5
35 кВ	0,4
6 ÷ 20 кВ	0,4
0,4 кВ	0,35

Сравнение $tg\varphi_3$, $tg\varphi_3$, $tg\varphi_{ПРЕД}$

$$tg\varphi_3 \leq tg\varphi_{ПРЕД}$$

$$tg\varphi_3 < tg\varphi_{ПРЕД}$$

Оптимальное размещение КУ в распределительной сети

1. Исключение узлов, в которых установка КУ невозможна или нежелательна.
2. Определение граничного значения уменьшения потерь мощности в сети, при котором установка КУ еще выгодна

$$\delta P_{ГР} = \frac{3_{КУ}}{C_{\Delta W} T} = \frac{(E + \alpha_{\Sigma}) K_{КУ}}{C_{\Delta W} T}$$

3. Вычисление значений снижения потерь мощности после установки КУ

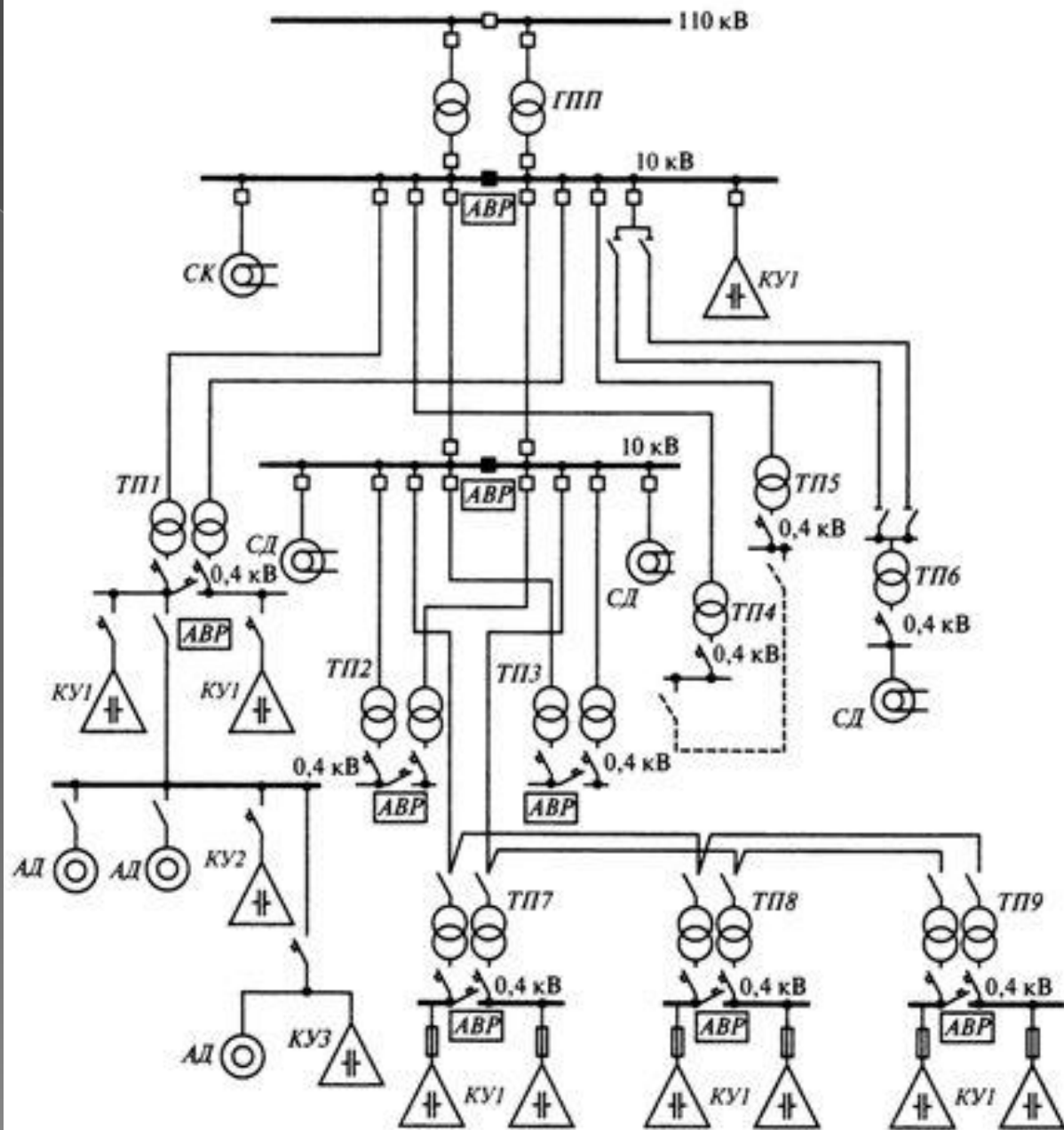
$$\delta P_K = \Delta P_0 - \Delta P_{КУ_i}$$

4. Определение целесообразности установки КУ в узле

Если $\delta P_K \geq \delta P_{ГР}$, то установка КУ оправдана

5. Определение узла сети, при установке КУ в котором будет наибольшее снижение потерь мощности

$$\delta P_K = \max \{ \delta P_i \}$$



- ❑ «Методические указания по проектированию развития энергосистем», утвержденные приказом Минпромэнерго России от 30 июня 2003 года № 281.
- ❑ «Инструкция по проектированию городских электрических сетей». РД 34.20.185-94 (СО 153-34.20.185-94, приказ ОАО РАО «ЕЭС России» от 14.08.2003 №4 22).
- ❑ Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 № 229, зарегистрированные в Минюсте (регистрационный № 4799 от 20 июня 2003 года).
- ❑ Информационное письмо ОАО РАО «ЕЭС России» от 7.07.2006 № ВП-170 «О рекомендациях к разработке программ «Реактивная мощность» и «Повышение надежности распределительных электрических сетей».
- ❑ НТП ЭПП-94 (ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ имени Ф.Б.Якубовского) «Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий» М788-1090
- ❑ Правила учета электрической энергии. Минтопэнерго России, 19.09.1996; Минстрой России, 20.09.1996

- ❑ СО 153-34.20.112 (РД 34.20.112) Указания по выбору средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности при проектировании электроснабжения сельскохозяйственных объектов и электрических сетей сельскохозяйственного назначения: /Утв. Минэнерго СССР
- ❑ СО 153-34.20.544 (РД 34.20.544) Типовая инструкция по оптимальному управлению потоками реактивной мощности и уровнями напряжения в электрических сетях энергосистем: ТИ 34-70-002-82: /Утв. Главтехупр. Минэнерго СССР
- ❑ СТО 56947007-29.180.02.140-2012 Методические указания по проведению расчетов для выбора типа, параметров и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в ЕНЭС. ПАО «ФСК ЕЭС»
- ❑ РТМ 36.18.32.6-92 Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий

экономическая величина реактивной мощности $Q_э$ в часы максимальных нагрузок системы определяется как

$$Q_э = \operatorname{tg} \phi_э \cdot P_p$$

1. Если $Q_э \geq Q_p$, то применять дополнительные меры по компенсации реактивной мощности не обязательно.
2. Если $Q_э > Q_p$, то мощность компенсирующих устройств $Q_{ку}$ определим как $Q_{ку} = Q_p - Q_э$.
3. Если $Q_p < 0$, то это говорит о том, что потребитель генерирует реактивную мощность. Величина генерации не должна превышать 10 % от P_p .

Для нахождения величины компенсирующих устройств подключенных к шинам 6-10 кВ, определяем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum Q_{pB}}{\sum P_{pB}}$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ - коэффициент расчетной реактивной мощности, подключенной к шинам 6-10 кВ нагрузки с напряжением >1000 В; $\sum Q_{pB}$ и $\sum P_{pB}$ - суммарная реактивная и активная расчетные мощности нагрузки с напряжением 6-10 кВ, подключенной к шинам.

Если $\operatorname{tg} \varphi_B \leq \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}$ размещать компенсирующие устройства на шинах 6-10 кВ не рекомендуется.

Если $\operatorname{tg} \varphi_B > \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}$, то мощность компенсирующих устройств, подключаемых к шинам 6-10 кВ:

$$Q_{\text{ку.В}} = (\operatorname{tg} \varphi_B - \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}) \cdot P_p$$

Оставшуюся часть компенсирующих устройств размещаем на стороне низшего напряжения цеховых подстанций:

$$Q_{\text{ку.н}} = Q_{\text{ку}} - Q_{\text{ку.в}}$$

Распределение компенсирующих устройств производим пропорционально расчетным реактивным нагрузкам цехов.

$$Q_{\text{ку.ни}} = (Q_{\text{ку.н}} \cdot Q_{\text{рнi}}) / \sum Q_{\text{рн}}$$

где $Q_{\text{ку.ни}}$ - мощность компенсирующих устройств i -го цеха на низком напряжении;

Примечание: 1) устанавливать компенсирующие устройства мощностью менее 150 квар обычно экономически невыгодно;
2) на шинах низшего напряжения цеховой подстанции может быть установлена компенсирующая установка большей мощности, чем по расчету с целью снижения перетоков реактивной мощности и доведению коэффициента реактивной мощности по конкретной цеховой подстанции до необходимого уровня ($0,3 \div \text{tg } \phi_3$).

Оставшуюся часть компенсирующих устройств размещаем на стороне низшего напряжения цеховых подстанций:

$$Q_{\text{ку.н}} = Q_{\text{ку}} - Q_{\text{ку.в}}$$

Распределение компенсирующих устройств производим пропорционально расчетным реактивным нагрузкам цехов.

$$Q_{\text{ку.ни}} = (Q_{\text{ку.н}} \cdot \Delta P_i) / \Sigma \Delta P_i$$

где $Q_{\text{ку.ни}}$ - мощность компенсирующих устройств i -го цеха на низком напряжении;

ΔP_i – потери в питающей цепи подстанции i -го цеха

$$\Delta P_i = I^2 (R_{\text{КЛ}i} + R_{\text{Тр}i})$$

В случае распределения на стороне 0,4 кВ одной подстанции, вначале распределяется общая мощность БСК подстанции, а затем по силовым пунктам от подстанции тем же способом.

При этом $\text{tg}\varphi$ должен быть положительным.