

Лабораторная работа №9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ОДНОЙ ИЛИ НЕСКОЛЬКИМИ НАГРУЗКАМИ.

Цель работы: Получить практические навыки по определению потерь напряжения в линиях переменного тока экспериментальным и расчетным способами.

Программа работы:

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, необходимыми для выполнения работы.
2. Собрать схему Рис. 1 и экспериментально определить потери напряжения в однофазной линии переменного тока с одной нагрузкой.
3. Определить потери напряжения по опытным данным и расчетным формулам. Построить зависимости $\Delta U\% = f(\cos \varphi)$.
4. Построить векторные диаграммы для одной нагрузки по данным начала линии и по данным конца линии.
5. Собрать схему Рис. 2 и экспериментально определить потери напряжения в однофазной линии переменного тока с двумя нагрузками.
6. Определить потери напряжения по опытным данным и расчетным формулам. Построить зависимость $f(\cos \varphi)$.
7. Сделать выводы по содержанию работы.

Выполнение работы

1. Для выполнения лабораторной работы предлагается установка, представляющая собой однофазную модель ЛЭП переменного тока с двумя нагрузками. Модель состоит из стенда, на котором показаны активные и индуктивные сопротивления участков линии, точки 1 и 2 подключения нагрузок, первичные и вторичные обмотки дросселей с подмагничиванием L_1 и L_2 и выводы этих обмоток. Кроме того, на стенде закреплены ключи SA_1 и SA_2 , с помощью которых можно изменять число витков первичных обмоток дросселей L_1 и L_2 , а также два амперметра типа

Э 365-1. При выполнении работы используются реостаты сопротивлением $R = 100 \text{ Ом}$ для регулировки тока нагрузки, реостаты сопротивлением $R = 1000 \text{ Ом}$ и $R = 2200 \text{ Ом}$ для регулировки $\cos \varphi$ нагрузки, фазометры типа ЭЛФ, астатический вольтметр типа АСТВ, регулятор напряжения типа ЛАТр со встроенным вольтметром. Регулятор напряжения, вольтметр, фазометры и ползунковые реостаты располагаются на лабораторном столе установленном вплотную к стенду с моделью ЛЭП.

2. При сборке схемы для определения потерь напряжения в линии переменного тока с одной нагрузкой следует замкнуть накоротко сопротивление участка линии $R = 3,6 \text{ Ом}$. В качестве активного сопротивления нагрузки использовать ползунковый реостат с $R = 100 \text{ Ом}$, включенный как переменное сопротивление. В качестве реактивного сопротивления нагрузки использовать дроссель L_1 расположенный на стенде слева. Во вторичную обмотку этого дросселя включаются последовательно соединенные ползунковые реостаты с сопротивлениями 1000 и 2200 Ом. В качестве фазометра в цепи нагрузки использовать фазометр проградуированный в углах, а в качестве фазометра в линейной цепи фазометр проградуированный в $\cos \varphi$. Астатический вольтметр АСТВ включить в конце линии. ЛАТр подключить к розетке, установленной на стенде (напряжение на розетку подается рубильником установленным на стенде). Перед началом опыта перевести заданные $\cos \varphi$ и в углы, используя номограмму на торцевой части фазометра нагрузки. Реостаты нагрузки и реостаты, включенные во вторичную обмотку дросселя нагрузки поставить в положение соответствующее их максимальному сопротивлению. Ключи SA_1 поставить в нижнее положение. Положение ручки регулировки ЛАТр должно соответствовать выходному напряжению равному нулю (крайнее левое положение). Включить рубильник и регулятором напряжения подать на вход модели (начало ЛЭП) напряжение равное 170 В. С помощью реостата нагрузки установить ток нагрузки

равный 1,8 А с помощью реостатов включенных во вторичную обмотку дросселя L_1 установить заданное значение $\cos\varphi$ (или угла). Так как регулировка тока нагрузки и угла нагрузки взаимно влияют друг на друга, то их лучше производить двум студентам: один устанавливает ток нагрузки с помощью реостата нагрузки 1,8 А, а другой добивается требуемой величины $\cos\varphi$ с помощью реостатов, включенных во вторичную обмотку дросселя. Опыт проводится при неизменном напряжении 170 В в начале линии и неизменном токе нагрузки 1,8А, на протяжении опыта меняется только $\cos\varphi$ нагрузки. Если при изменении $\cos\varphi$ очередное его значение установить невозможно, то ключи SA_1 следует переключить в вернее положение (нижнее положение ключей соответствует высоким значениям $\cos\varphi$ нагрузки, а их верхнее положение низким значениям $\cos\varphi$ нагрузки). Полученные значения напряжения в конце линии $U_{2\phi}$ и $\cos\psi_L$ между током и напряжением в начале линии заносятся в таблицу 1.

Таблица 1.

Экспериментальные данные для определения потерь
напряжения при $U_{1\phi} = 170 \text{ В}$ $I_H = 1,8 \text{ А}$

$\cos\varphi_n$	0,95	0,9	0,85	0,7	0,6	0,4	
φ_n							
$\cos\psi_L$							
$U_{2\phi}$							

3. Потери напряжения по опытным данным определяют по выражению

$$\Delta U = U_{1\phi} - U_{2\phi}, \text{ где}$$

$U_{1\phi} = 170 \text{ В}$ – напряжение в начале линии;

$U_{2\phi}$ – напряжение в конце линии при заданном $\cos\varphi$ нагрузки, В

Определение потерь напряжения по расчетным формулам сводится к определению продольной составляющей падения напряжения. При этом возможны два варианта

$$1) \Delta U_1 = I_H \cdot R \cdot \cos \varphi + I_H \cdot X \cdot \sin \varphi, \text{ где}$$

ΔU_1 – продольная составляющая падения напряжения принимаемая равной потери напряжения, В

$I_H = 1,8 \text{ А}$ – ток нагрузки;

R – активное сопротивление линии, Ом (полученное суммированием всех активных составляющих сопротивления участков линии на модели);

X – реактивное сопротивление линии, Ом;

φ – аргумент нагрузки (угол между током нагрузки и напряжением в конце линии $U_{2\phi}$);

$$2) \Delta U_2 = I_L \cdot R \cdot \cos \psi + I_L \cdot X \cdot \sin \psi, \text{ где}$$

I_L – ток протекающий по линии в нашем случае $I_L = I_H = 1,8 \text{ А}$;

R, X – активное и реактивное сопротивления всех участков линии, Ом;

ψ – угол сдвига между током линии I_L и напряжением в ее начале $U_{1\phi}$.

Обычно величину потерь напряжения выражают в процентах от номинального значения напряжения, в нашем случае

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U \cdot 100}{170},$$

где ΔU – величина потерь напряжения, полученная по опытным данным и расчетным путем.

В отчете приводятся расчеты для одного, заданного преподавателем значения $\cos \varphi$ нагрузки. Результаты расчета сводятся в таблицу 2.

Таблица 2

Определение потерь напряжения по опытным данным
и расчетным формулам

$\cos\varphi_n$	0,95	0,9	0,85	0,7	0,6	0,4
ΔU						
$\Delta U\%$						
ΔU_1						
$\Delta U_1\%$						
ΔU_2						
$\Delta U_2\%$						

На основании таблицы 2 на одном графике строятся зависимости

$$\Delta U\% = f(\cos\varphi) \quad \Delta U_1\% = f(\cos\varphi) \quad \Delta U_2\% = f(\cos\varphi)$$

4. Для одной нагрузки строятся векторные диаграммы для двух случаев

1) По данным конца линии, когда известны напряжение на нагрузке $U_{2\phi}$, ток нагрузки I_H и $\cos\varphi_n$, тогда по второму закону Кирхгофа $\dot{U}_{1\phi} = \dot{U}_{2\phi} + \Delta\dot{U}$

2) По данным начала линии, когда известны напряжение в начале линии, ток, протекающий по линии и линейный аргумент ψ (или $\cos\psi$)

$$\dot{U}_{2\phi} = \dot{U}_{1\phi} - \Delta\dot{U}$$

Графически решая эти векторные уравнения получим векторные диаграммы, на которых следует указать отрезки равные потере напряжения, продольной составляющей падения напряжения, поперечной составляющей падения напряжения. Все построения производятся в выбранном масштабе.

5. Схема опыта по экспериментальному определению потерь напряжения в линии с двумя нагрузками приведена на рис. 2. Нагрузки подключаются к точкам 1 и 2 аналогично схеме на рис. 1. Для первой нагрузки в качестве элемента регулирующего $\cos\varphi$ нагрузки используется дроссель L_1 , а для второй дроссель L_2 . Опыт проводится при напряжении в начале линии равным 170 В и одинаковых токах нагрузки равных 1,8 А изменяется $\cos\varphi$

нагрузки, но во всех опытах $\cos\varphi$ первой нагрузки равен $\cos\varphi$ второй нагрузки.

Результаты опытов заносятся в таблицу, аналогичную таблице 1, в которой $\cos \varphi$ нагрузок должны принимать следующие значения 0,92; 0,9; 0,85; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4.

Выполнение опыта аналогично выполнению опыта с одной нагрузкой, с той разницей, что необходимо устанавливать одинаковый режим для двух нагрузок. Это можно делать или одновременно, когда работают сразу четыре студента или последовательно, когда два студента устанавливают режим сначала первой нагрузки, а затем второй. В любом случае отсчет по приборам ($U_{2\phi}$ и $\cos\psi$) производится только тогда, когда напряжение в начале линии $U_{1\phi} = 170\text{В}$, токи нагрузок $I_{1н} = I_{2н} = 1,8\text{ А}$, $\cos \varphi_{н1} = \cos\varphi_{н2}$.

6. Потери напряжения по опытным данным определяются аналогично пункту 3 программы.

Расчетное значение потерь напряжения определяется для двух случаев:

1) По токам нагрузки и аргументу нагрузки

$$\Delta U_1 = \sum (I_n \cdot R \cdot \cos\varphi + I_n X \sin \varphi), \text{ где}$$

ΔU_1 – продольная составляющая падения напряжения в линии, В;

I_n – ток нагрузки, А;

R и X – активное и индуктивное сопротивление участка линии от источника питания до точки приложения нагрузки (до рассматриваемой нагрузки);

φ -аргумент нагрузки (определяется по фазометру, подключенному к нагрузке).

2) По току участка линии и аргументу линейной нагрузки

$$\Delta U_2 = \sum (I_y \cdot R_y \cdot \cos\psi + I_y X_y \sin \psi), \text{ где}$$

R_y и X_y – активное и индуктивное сопротивление участка линии, Ом;

I_y – ток протекающий по соответствующему участку, А;

Ψ – аргумент линейной нагрузки (определяется по показателям фазометра установленного в начале линии).

В отчете приводятся расчеты для одного заданного преподавателем значения $\cos \varphi$ нагрузки. Результаты расчета сводятся в таблицу, аналогичную таблице 2, при $\cos \varphi$ нагрузки равным 0,92; 0,9; 0,85; 0,8; 0,5; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4.

На основании этой таблицы на одном графике строятся зависимости

$$\Delta U\% = f(\cos\varphi); \quad \Delta U_1\% = f(\cos\varphi); \quad \Delta U_2\% = f(\cos\varphi).$$

7. По результатам работы, исходя из рассмотрения и сопоставления опытных и расчетных данных, а также построенных векторных диаграмм, следует самостоятельно сделать выводы, включающие ответы на следующие вопросы:

- 1) Почему расчетные соотношения приведенные в методических указаниях можно использовать для определения потери напряжения?
- 2) Какое из соотношений предпочтительнее применять, и в каких случаях?
- 3) Каким образом зависят потери напряжения от $\cos \varphi$ нагрузки и в каком случае они достигают максимума?
- 4) Каким образом погрешность при определении потери напряжения зависит от параметров линии и нагрузки, в каком случае она достигает максимума?

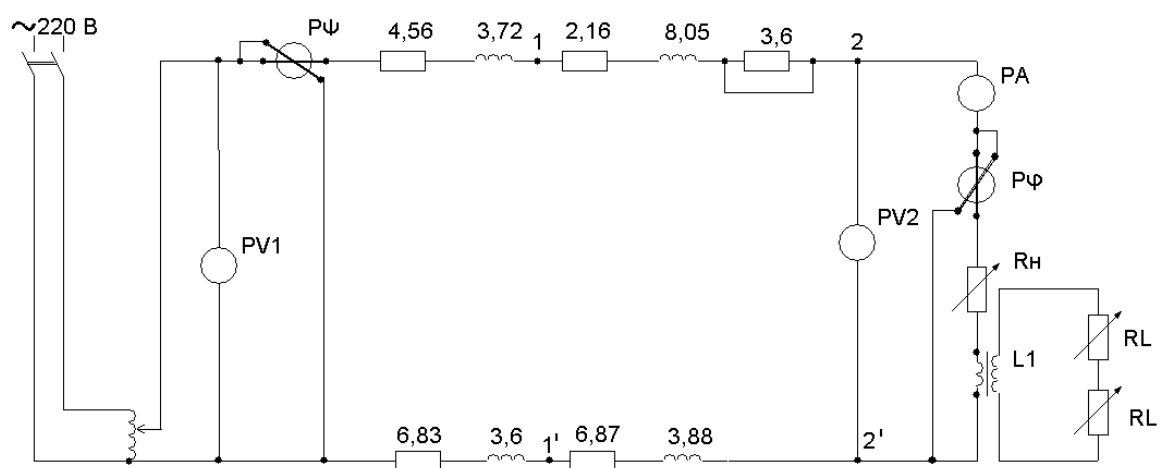


Рис.1. Определение потери напряжения в однофазной линии переменного тока с одной нагрузкой.

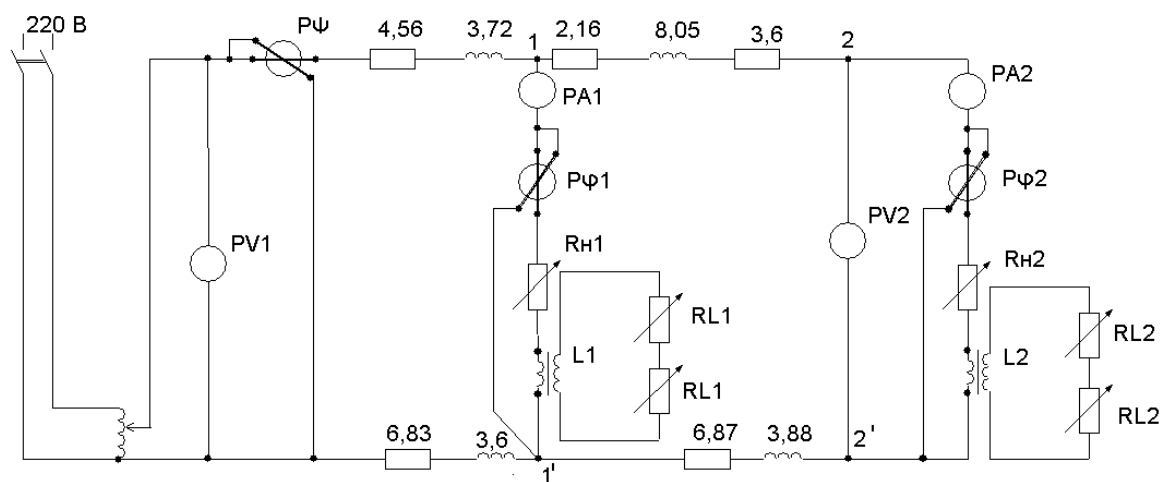


Рис.2. Определение потери напряжения в однофазной линии переменного тока с двумя нагрузками.

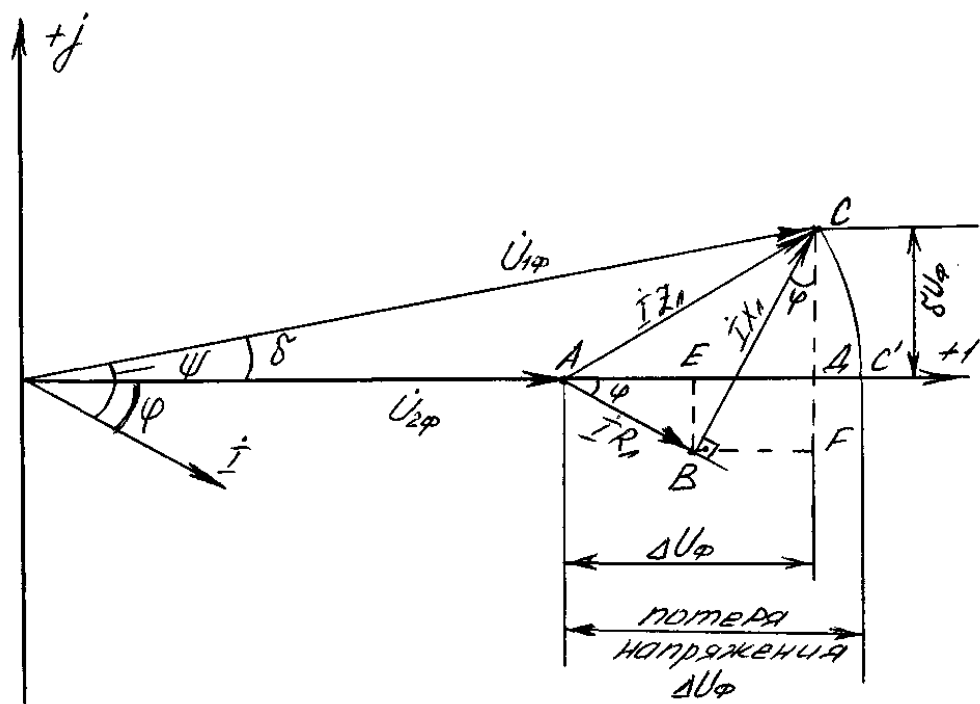


Рис.3. Векторная диаграмма для одной фазы линии построенная по данным ее конца.

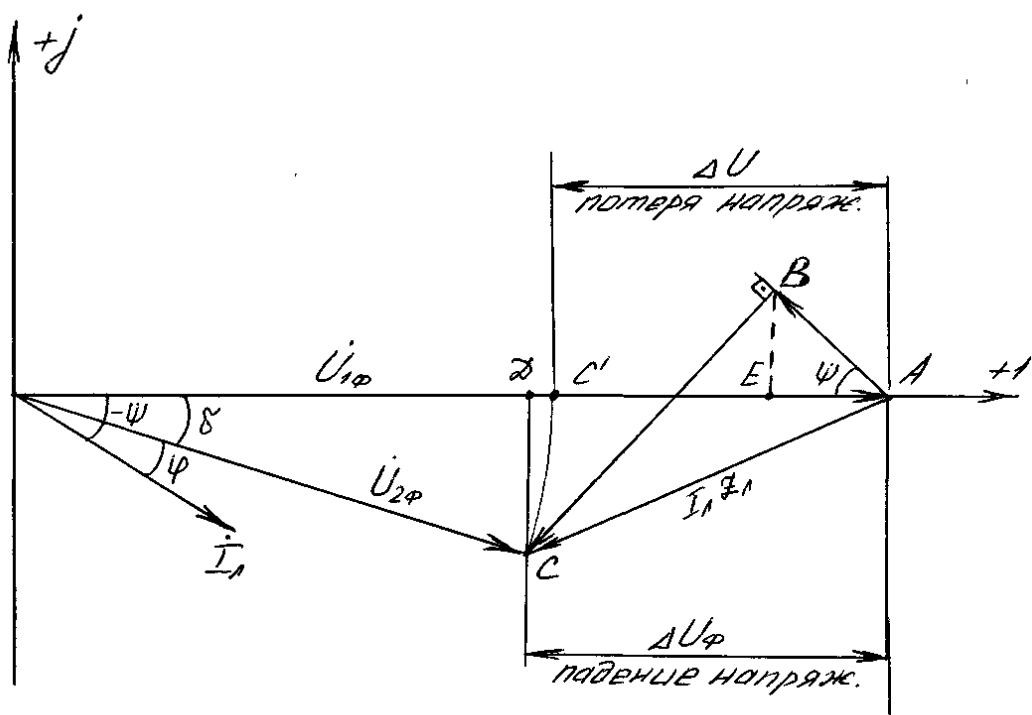


Рис.4. Векторная диаграмма для одной фазы линии, построенная по данным ее начала.

Краткие теоретические сведения

Потеря и падение напряжения в сетях переменного тока

Рассмотрим линию трехфазного переменного тока с одной нагрузкой. Будем считать, что нагрузка всех трех фаз линии одинакова. В этом случае трехфазную сеть можно представить в виде одной линии и вести расчеты для фазных напряжений и токов, а затем перейти к их линейным значениям. Проведем расчет отдельно по данным у приемного и передающего конца линии.

Пусть нам известны активное $R_{\text{л}}$ и индуктивное $X_{\text{л}}$ сопротивления линии, а также напряжение в конце линии $U_{2\phi}$, ток нагрузки $I_{\text{н}}$ и аргумент нагрузки ϕ . Тогда по второму закону Кирхгофа напряжение в начале линии $U_{1\phi}$ определяется по выражению $\dot{U}_{1\phi} = \dot{U}_{2\phi} + \Delta\dot{U}$, где $\Delta\dot{U} = \dot{I} \dot{Z} = I_{\text{н}} R_{\text{л}} + j I_{\text{н}} X_{\text{л}}$ - падение напряжения в полном сопротивлении линии.

Решим векторное уравнение для $\dot{U}_{1\phi}$ графически, для чего:

- 1) Отложим вектор фазного напряжения $\dot{U}_{2\phi}$ по вещественной оси (отрезок ОА);
- 2) Под углом ϕ к напряжению $\dot{U}_{2\phi}$ отложим вектор тока нагрузки $\dot{I}$ в сторону отставания (по часовой стрелке);
- 3) Вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии $\dot{I} \cdot R_{\text{л}}$ (отрезок АВ) откладываем в конце вектора напряжения $\dot{U}_{2\phi}$ параллельно вектору тока;
- 4) Добавляем к нему вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении линии $j I_{\text{н}} X_{\text{л}}$ под прямым углом к вектору $\dot{I} R_{\text{л}}$ в сторону опережения (отрезок ВС);
- 5) Соединим полученную точку С с началом координат О и точкой А.

Тогда вектор $\overline{OC}$ будет являться вектором фазного напряжения в начале линии $\dot{U}_{1\phi}$, ориентированный по отношению к току под углом ψ , а к напряжению $\dot{U}_{2\phi}$ под углом δ .

Вектор $\overline{AC}$ будет представлять падение напряжения в полном сопротивлении линии $\dot{I}\dot{Z}$.

Геометрическая разность между напряжением в начале и в конце линии называют *падением напряжения*.

$$\overline{AC} = \overline{OC} - \overline{OA} = \dot{U}_{1\phi} - \dot{U}_{2\phi} = \dot{I}\dot{Z}$$

Для определения потери напряжения на диаграмме засекаем вектором $\overline{OC}$ отрезок OC^1 на вещественной оси.

$$\text{Очевидно, что отрезок } AC^1 = OC^1 - OA = U_{1\phi} - U_{2\phi} = \Delta U$$

Алгебраическую разность напряжений в начале и в конце линии называют *потерей напряжения* (ΔU).

Потеря напряжения практически может быть определена как разность показаний вольтметра, включенных в начале и в конце линии.

Численная величина полного падения напряжения в линии равна длине отрезка AC.

$$IZ_{\text{л}} = \sqrt{(IR_{\text{л}})^2 + (IX_{\text{л}})^2}$$

Падение напряжения в линии может быть разложена на две составляющих вдоль известного напряжения $U_{2\phi}$ (по вещественной оси) отрезок AD и по направлению, перпендикулярному известному напряжению $\dot{U}_{2\phi}$ (по оси мнимых величин) отрезок DC.

Эти составляющие называются продольной ΔU_{ϕ} и поперечной δU_{ϕ} составляющей падения напряжения.

$$\Delta U_{\phi} = AD \quad \delta U_{\phi} = DC$$

Численное значение падения напряжения в этом случае определяется по формуле

$$IZ = \sqrt{(AD)^2 + (DC)^2} = \sqrt{\Delta U_{\phi}^2 + \delta U_{\phi}^2}$$

Из векторной диаграммы видно, что комплексное значение напряжения в начале линии равно

$$\dot{U}_{1\phi} = (\dot{U}_{2\phi} + \Delta U_{\phi}) + j\delta U_{\phi}$$

Соответственно модуль и фаза напряжения в начале линии

$$U_{1\phi} = \sqrt{(U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta U_{\phi}}{U_{2\phi} + \Delta U_{\phi}}$$

При сравнительно небольших значениях угла δ между векторами напряжений в начале $\dot{U}_{1\phi}$ и в конце линии $\dot{U}_{2\phi}$ выражение $U_{1\phi} = \sqrt{(U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2}$ можно упростить, применив разложение бинома в ряд.

$$U_{1\phi} = U_{2\phi} + \Delta U_{\phi} + \frac{(\delta U_{\phi})^2}{2(U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})}$$

Из этого выражения приблизительно определяется величина потери напряжения в линии

$$\Delta U = U_{1\phi} - U_{2\phi} = \Delta U_{\phi} + \frac{(\delta U_{\phi})^2}{2(U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})} \text{ или}$$

$$\Delta U = \Delta U_{\phi} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \delta (U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})$$

Отсюда видно, что при сравнительно небольших значениях угла δ ($0,5 \div 2^\circ$ для реальных сетей) потери напряжения в основном определяются продольной оставляющей падения напряжения $\Delta U \approx \Delta U_{\phi}$, что справедливо во всех сетях напряжением до 110 кВ включительно. В обычных условиях ошибка от такого запущения не превышает 5%.

На векторной диаграмме погрешность в определении потери напряжения выражается отрезком $DC = AC - AO = \Delta U - \Delta U_{\phi}$, следовательно

определенное через продольную составляющую падения напряжения значение потери напряжения получается меньше ее истинного значения.

Величина отрезка $AD = \Delta U_\phi = AE + ED$ поэтому из геометрических соотношений очевидно, что продольная составляющая падения напряжения может быть выражена следующим образом:

$$\Delta U_\phi = IR_A \cdot \cos \varphi + I X_A \sin \varphi$$

а поперечная составляющая падения напряжения

$$\delta U_\phi = I X_n \cos \varphi - I R_A \sin \varphi$$

Для трехфазной линии эти соотношения выглядят следующим образом:

$$\Delta U_\phi = \sqrt{3} (IR_n \cdot \cos \varphi + I X_A \sin \varphi)$$

$$\delta U_\phi = \sqrt{3} (I X_n \cos \varphi - I R_A \sin \varphi)$$

От токов можно перейти к мощности, умножив и разделив правые части этих уравнений на U_n , тогда

$$\Delta U_\phi = \frac{\sqrt{3} UI \cdot \cos \varphi R_n + \sqrt{3} UI \sin \varphi X_A}{U_n} = \frac{PR_n + QX_n}{U_n}$$

$$\delta U_\phi = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi X_n - \sqrt{3} UI \sin \varphi R_n}{U_n} = \frac{PX_n - QR_n}{U_n}$$

Если линия имеет несколько нагрузок, то потеря напряжения в такой линии определяется

$$\Delta U = \Delta U_\phi = \sqrt{3} \sum (IR_n \cos \varphi + I X_n \sin \varphi), \text{ где}$$

I – ток соответствующей нагрузки, А

R_n, X_n – активные и индуктивные сопротивления от начала линии до соответствующей нагрузки, Ом

φ – аргумент нагрузки.

При определении потери напряжения как продольную составляющую падения напряжения мы будем иметь погрешность равную нулю в том случае, если поперечная составляющая падения напряжения равна нулю

$$\delta U_{\phi} = I X_{\text{л}} \cos \varphi - I R_{\text{л}} \sin \varphi$$

В этом случае $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_{\text{л}}}{R_{\text{л}}}$, то есть $\operatorname{tg} \varphi$ нагрузки на участке линии совпадает с отношением реактивной и активной составляющими сопротивления участка линии (с tg линии). Потери при этом будут максимальны. С увеличением $\cos \varphi$ нагрузки потери будут уменьшаться, а погрешность в определении потери напряжения будет расти.

Если проводить расчеты по данным передающего конца линии, то есть по известному напряжению в начале линии $U_{1\phi}$, току в линии $I_{\text{л}}$ и известному линейному аргументу ψ , то при известных сопротивлениях $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$ можно определить напряжение в конце линии $\dot{U}_{2\phi} = \dot{U}_{1\phi} - \Delta \dot{U}$. Для того чтобы определить потерю и падение в этом случае построим векторную диаграмму по данным начала линии.

Для построения векторной диаграммы необходимо:

- 1) Отложить вектор фазного напряжения в начале линии $U_{1\phi}$ по вещественной оси (отрезок ОА);
- 2) Под углом ψ к напряжению $\dot{U}_{1\phi}$ отложить вектор ток линии $I_{\text{л}}$ в сторону отставания;
- 3) Вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии $I_{\text{л}} R$ (отрезок АВ) отложить в конце вектора напряжения $\dot{U}_{1\phi}$ параллельно вектору тока $\dot{I}_{\text{л}}$ в противоположном от него направлении.
- 4) Добавить к нему вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении линии $I_{\text{л}} X_{\text{л}}$ под прямым углом к вектору $I R_{\text{л}}$ в сторону опережения (отрезок ВС).
- 5) Соединить полученную точку с началом координат О и точкой А.

Тогда вектор $\overline{OC}$ будет являться вектором фазного напряжения в конце линии, ориентированной по отношению к току под углом φ , а к заданному напряжению $U_{1\phi}$ под углом δ . Вектор $\overline{AC}$ будет представлять

падение напряжения в полном сопротивлении линии $\dot{I}\dot{Z}$. Этот вектор $\overline{AC} = \dot{I}\dot{Z}$ представляет собой геометрическую разность напряжений в начале и конце линии.

Засечен вектором $\overline{OC}$ отрезок OC^1 на вещественной оси. Тогда отрезок $AC^1 = OA - OC^1$ представляет собой потерю напряжения в линии $\Delta U = U_{1\phi} - U_{2\phi}$.

Падение напряжения в линии может быть разложено на продольную и поперечную составляющие.

Продольная составляющая падения напряжения в ΔU_{ϕ} есть проекции вектора падения напряжения $\dot{I}_l \dot{Z}$ на направление известного напряжения U_{ϕ} (на вещественную ось) и представлена на диаграмме отрезком AD. Поперечная составляющая падения напряжения δU_{ϕ} есть проекции вектора падения напряжения $\dot{I}_l \dot{Z}$ на направление перпендикулярное известному напряжению $\dot{U}_{1\phi}$ (на ось мнимых величин) и определяется отрезком DC.

При определении продольной ΔU_{ϕ} и поперечной δU_{ϕ} составляющих падения напряжения $\dot{I}\dot{Z}$ по данным начала линии и по данным конца линии, очевидно, получаются значения продольной и поперечной составляющей не равные между собой $\Delta U_{\phi_n} \neq \Delta U_{\phi_k}$ $\delta \Delta U_{\phi_n} \neq \delta \Delta U_{\phi_k}$ (индексы n и k относятся к началу и концу линии). Это получается потому, что один и тот же вектор падения напряжения $\dot{I}\dot{Z}$ проектируются на разной оси $\dot{U}_{1\phi}$ и $\dot{U}_{2\phi}$ (они сдвинуты друг относительно друга на угол δ).

Комплекс напряжения в конце линии можно записать следующим образом:

$$\dot{U}_{2\phi} = (\dot{U}_{1\phi} - \Delta U_{\phi}) - j\delta U_{\phi}$$

Тогда его модуль и фаза будут равны

$$U_{2\phi} = \sqrt{(U_{1\phi} - \Delta U)^2 + (\delta U_{\phi})^2}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta U_{\phi}}{U_{1\phi} - \Delta U_{\phi}}$$

Применяем разложение бинома в ряд получены выражение для напряжения в конце линии

$$U_{2\phi} = U_{1\phi} - \Delta U_{\phi} + \frac{(\delta U_{\phi})^2}{2(U_{1\phi} - \Delta U_{\phi})}$$

Из этого выражения приблизительно определяется величина потери напряжения в линии

$$\Delta U = U_{1\phi} - U_{2\phi} \approx \Delta U_{\phi} - \frac{(\delta U_{\phi})^2}{2(U_{1\phi} - \Delta U_{\phi})}$$

При сравнительно небольших углах δ между векторами напряжений начала и конца линии обычно пренебрегают вторым членом в этой формуле и считают потерю напряжения равной продольной составляющей падения напряжения. Очевидно, что полученные таким образом значение потери напряжения будет несколько больше истинного его значения

$$\Delta U = U_{1\phi} - U_{2\phi}$$

На векторной диаграмме эта погрешность представлена отрезком

$$DC^I = AD - AC = \Delta U_{\phi} - \Delta U$$

Выражение для определения продольной и поперечной составляющих падения напряжения через данные начала линии выглядят аналогично выражениям, составленным по данным ее конца.

Для продольной составляющей падения напряжения

$$\Delta U_{\phi} = I_{\text{л}} R_{\text{л}} \cos \psi + I_{\text{л}} X_{\text{л}} \sin \Psi$$

Для поперечной составляющей падение напряжения

$$\delta U_{\phi} = I_{\text{л}} X_{\text{л}} \cos \Psi - I_{\text{л}} R_{\text{л}} \sin \psi$$

Для трехфазной линии эти соотношения выглядят следующим образом:

$$\Delta U_{\phi} = \sqrt{3}(I_{\text{л}} R_{\text{л}} \cos \psi + I_{\text{л}} X_{\text{л}} \sin \Psi)$$

$$\delta U_{\phi} = \sqrt{3}(I_{\text{л}} X_{\text{л}} \cos \Psi - I_{\text{л}} R_{\text{л}} \sin \psi)$$

Перейдя от токов к мощности, получим:

$$\Delta U_{\phi} = \frac{P_{\text{л}} R_{\text{л}} + Q_{\text{л}} X_{\text{л}}}{U_{\text{н}}}$$

$$\delta U_{\phi} = \frac{P_{\text{л}} X_{\text{л}} + Q_{\text{л}} R_{\text{л}}}{U_{\text{н}}}$$

Если линия имеет несколько нагрузок, то потеря напряжения в такой линии определяется:

$$\Delta U = \Delta U_{\phi} = \sqrt{3 \sum (I_{\text{л}} R_{\text{л}} \cos \psi + I_{\text{л}} X_{\text{л}} \sin \Psi)}, \text{ где}$$

$I_{\text{л}}$ – ток, протекающий по участку линии, А

$R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$ – активное и реактивное сопротивление соответствующего участка, Ом;

Ψ – угол сдвига между током, протекающим по участку линии и напряжением в его начале.

Если нагрузки заданы мощностями $P_{\text{л}}$ и $Q_{\text{л}}$ протекающими по участку линии с активным $R_{\text{л}}$ и реактивным $X_{\text{л}}$ сопротивлениями этих участков, то потеря напряжение определяется по формуле:

$$\Delta U \approx \frac{\sum (P_{\text{л}} R_{\text{л}} + Q_{\text{л}} X_{\text{л}})}{U_{\text{н}}}$$

При проектировании обычно известно напряжение в начале линии, длина ее участков (а значит и сопротивление $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$), нагрузки линии и точки их присоединения, отклонение напряжения на зажимах нагрузок. Поэтому потерю напряжения предпочтительнее определять по формулам, полученным для параметров начала линии. Так как результаты расчетов дают завышенное значение по сравнению с истинным, это позволяет правильно определять сечение проводов линии электропередач.

Контрольные вопросы

- 1) Как понимать термины «падение» и «потеря» напряжения?
- 2) Как определяется потеря напряжения расчетным путем?
- 3) Каким образом потеря напряжения зависит от $\cos\phi$ нагрузки?
- 4) При каких соотношениях аргументов линии и нагрузки потеря напряжения будет максимальной? Какова при этом будет погрешность при ее определении?
- 5) Чем обусловлена погрешность определения потери напряжения с помощью расчетных формул?
- 6) В чем разница расчетных формул, полученных по параметрам начала и конца линии?
- 7) Как пользоваться расчетными формулами, полученными по параметрам начала и конца линии в случае нескольких нагрузок?

Литература

1. Будзко И.А., Зуль Н.М. Электроснабжение сельского хозяйства. – М. Агропромиздат 1990.
2. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.Н. Электроснабжение сельского хозяйства. М. Колос, 2000.
3. Акимцев Ю.И., Веялис Б.С. Электроснабжение сельского хозяйства. М. Колос 1983.
4. Идельчик В.и. Электрические системы и сети. М. Энергоатомиздат 1989.