

4-я Всероссийская научно-техническая конференция  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Наука и молодежь - 2007»  
(НиМ-2007)

**СЕКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКА**

**ПОДСЕКЦИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Председатель секции - д.т.н., проф. О.К.Никольский,  
Секретарь – к.т.н., доцент Н.П. Воробьев  
Заседание секции состоится 27.04.2007 в 13-00 ауд. 115 «Д»

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Быстродействующий коммутатор с жидкометаллическими контактами. Марков П.А. - студент, Инкин А.И. - студент, Багаев А.И. - , к.т.н., профессор
2. Способ определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжением 110 кВ на холостом ходу, основанный на измерениях тока и напряжения. Р.Н. Воробьев – аспирант, Н.П. Воробьев – к.т.н., доцент
3. Способ определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжением 110 кВ под нагрузкой, основанный на измерениях тока и напряжения. Р.Н. Воробьев – аспирант, Н.П. Воробьев – к.т.н., доцент

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ КОММУТАТОР С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ  
КОНТАКТАМИ**

Марков П.А. - студент, Инкин А.И. - студент, Багаев А.И. - , к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
(г. Барнаул)

В униполярных машинах (УМ) постоянного тока наиболее сложная и проблемная часть – подвижный электрический контакт токосъемного аппарата.

При токосъеме в униполярной машине происходит процесс скрытой коммутации.

К внешней цепи подключаются новые элементарные проводники. Число этих проводников бесконечно.

Необходимость коммутации в униполярных машинах вытекает из соотношения ЭДС и магнитного потока:

$$e = -W_{\text{я}} \frac{d\Phi}{dt} = \text{const}$$

$$\int e dt = -\int W_{\text{я}} d\Phi_{\text{с}}$$

$$\Phi_{\text{с}} = -\frac{e}{W_{\text{я}}} t + \frac{C}{W_{\text{я}}}$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Характерной особенностью УМ является малая величина наводимой ЭДС, так как число витков якоря равно единице, и значительные токи до сотен килоампер.

Эти особенности определяют высокие требования к контактным устройствам.

Твердые металлические электроды имеют повышенное контактное сопротивление из-за наличия поверхностных плёнок, состоящих из оксидов, сульфидов металла, водных соединений, адсорбированных газов.

Контакт твердых электродов происходит в небольших областях, так называемых  $\alpha$ -пятнах. Проводимость в  $\alpha$ -точках обеспечивается за счет контактных эффектов: туннельного, эффекта снятия и фриттинг-эффекта.

Если между твердыми металлическими контактами имеются расплавленный металл, то при хорошем смачивании контакт осуществляется по всей поверхности, что обеспечивает низкое сопротивление.

В качестве жидкости для контактов ртуть, её сплавы и щелочные металлы.

При использовании ртути и её сплавов возникают проблемы из-за токсичности её паров.

Щелочные металлы самовыплавляются на воздухе и требуется система мер для их изоляции от контакта с воздухом.

На жидкостный слой в кольцевом канале действуют силы: центробежные, возникающие в результате вращения ротора, электромагнитные от токов нагрузки и магнитного поля, гравитационные и силы трения.

Надежность и работоспособность жидкометаллического контакта определяется взаимодействием перечисленных сил при всех возможных зажимах.

Механические потери в жидкометаллическом контакте пропорциональны произведению угловой скорости  $\omega$  на момент трения  $M_T$ , т.е.  $P = \omega \cdot M_T$ .

Существующие методики позволяют определить момент сопротивления в зависимости от вязкости жидкого металла, скорости поверхности якоря, конструкции якоря и числа Рейнольдса для ламинарного и турбулентного потоков.

Легкоплавные металлы определяют температуру контакта. В зависимости от выбранного металла температура контакта может быть низкой до  $200^0$  С, средней до  $500^0$  С и высокой более  $500^0$  С.

Линейные скорости подвешенного электрода изменяются в пределах от 50 до 150 м/с. Плотность тока в контакте от 400 до 6000 А/см<sup>2</sup>.

Потери в контактах определяются величиной удельного поверхностного сопротивления переходного слоя твёрдый электрод – жидкий металл.

$$G_k = \frac{\Delta U_k}{j_k}.$$

Для медных электродов величина  $G_k$  имеет порядок  $10^{-9}$  Ом·м<sup>2</sup>, для алюминиевых электродов –  $10^{-8}$  Ом· м<sup>2</sup>.

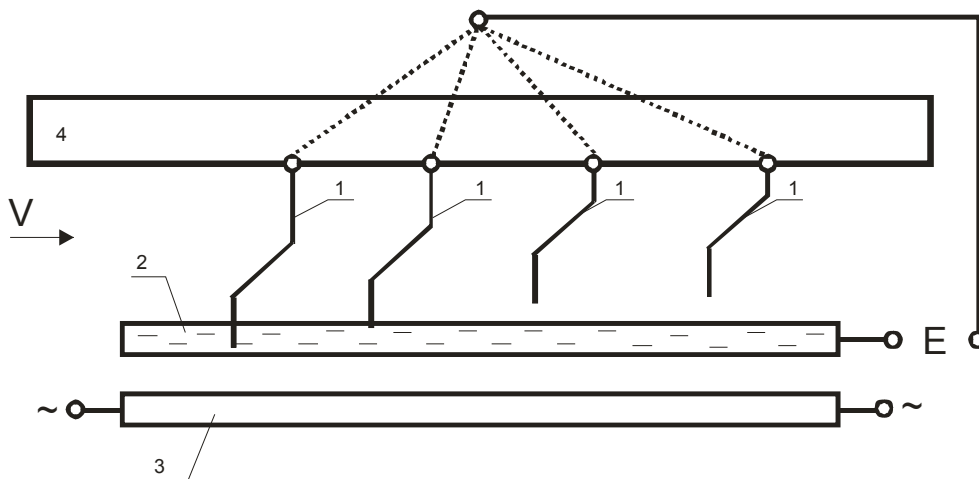
Скользкий контакт в УМ осуществляющий перемещение приемника электроэнергии относительно подвешенного якоря может быть заменен переключающим устройством – коммутатором.

Нами предпринята попытка такой замены. С этой целью разработан и изготовлен коммутатор с жидкометаллическими контактами.

Вариант использования коммутатора на полупроводниковых приборах был исключен из-за значительного переходного сопротивления.

В качестве жидкого металла использован припой ПОС-80 с температурой плавления  $277^0$  С, что исключило вероятность появления токсичных паров и самовоспламенения при контакте с воздухом. Лучшим вариантом в дальнейшем следует считать использование сплава Вуда.

Электрическая схема коммутатора представлена на рисунке 1.



1 – подвижные (качающиеся контакты) 2 – ванна с расплавленным припоем 3 – ТЭН  
4 – Дисковый якорь

Рис. 1 - Электрическая схема коммутатора

Электроды 1 поочередно погружаются в ванну с расплавленным припоем под механическим воздействием эксцентриков, установленных на вращающемся валу. Вал приводится в движение электрическим двигателем с регулируемой частотой вращения. Погружаемая часть электродов изготовлена из алюминиевого сплава для исключения адсорбции расплавленного припоя.

Если температура алюминиевых электродов ниже температуры плавления припоя происходит затвердевание припоя на поверхности алюминиевого контакта. Для исключения этого электроды подогреваются с помощью специальных нагревателей из нихрома.

Сопротивление контакта определялось по величине падения напряжения на нём при пропускании через контакт постоянного тока. При токе  $I = 20$  А падение напряжения составило  $\Delta U = 50$  мВ, следовательно сопротивление контакта  $R_k = \frac{\Delta U}{I} = \frac{0.050}{20} = 0.0025$  Ом.

Расчетная частота переключений определяется через соотношение массы подвижного контакта к жесткости рессорной подвески и равна 16 Гц. Экспериментальное исследование коммутатора будет проводиться в ближайшее время.

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ, ОСНОВАННЫЙ НА ИЗМЕРЕНИЯХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Р.Н. Воробьев – аспирант, Н.П. Воробьев – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
(г. Барнаул)

Модели электрических сетей, построенные на принципах математического моделирования, иногда называются расчетными столами. Каждый элемент сети на них представляется схемой замещения, которая является моделью элемента. Расчетные столы переменного тока достаточно точно позволяют воспроизводить режимы сетей переменного тока.

Для контроля за параметрами режима расчетные столы снабжаются комплектами многопредельных измерительных приборов.

Нами разработан способ определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжением 110 кВ (активной, реактивной, полной мощности и  $\cos\varphi$ ), основанный только на измерениях тока и напряжения при известных или измеренных

активных и реактивных сопротивлениях модели.

Проследим разработанную методику измерения на примере холостого хода воздушной линии электропередачи.

Воздушная линия электропередачи протяженностью до 150-250 км, как правило, учитывается в расчетах П-образной схемой замещения (рисунок 1), где  $R_{\text{л}}$ ,  $X_{\text{л}}$ ,  $B_{\text{л}}$  - соответственно активное, индуктивное сопротивление и емкостная проводимость линии,  $U_1$ ,  $U_{\text{л}}$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_{\text{C1}}$ ,  $I_{\text{C2}}$ ,  $I$  - соответственно напряжения и токи.

Соответствующая векторная диаграмма имеет вид, представленный на рисунке 2.

На рисунке 2 символами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  обозначены фазовые углы между векторами токов и напряжений. Из рисунка 2 следует, что:

$$\varphi_2 = -90^\circ, \quad (1)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_{\text{C2}} = -90^\circ + \varphi_{\text{C2}}. \quad (2)$$

Известно также, что:

$$\cos \delta = \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_o^2}{2U_1U_2}, \quad (3)$$

откуда

$$\delta = \arccos \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_o^2}{2U_1U_2}, \quad (4)$$

аналогично:

$$\cos \varphi_{\text{C1}} = \frac{I_{\text{C1}}^2 + I_1^2 - I_{\text{C2}}^2}{2I_{\text{C1}}I}, \quad (5)$$

где

$$I_{\text{C1}} = U_1 \frac{B_o'}{2}, \quad I_{\text{C2}} = U_2 \frac{B_o''}{2}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$\cos \varphi_{\text{C2}} = \frac{U_1 B_o'}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B_o'} - \frac{U_2^2 B_o''^2}{4U_1 I_1 B_o'}, \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{C2}} = \arccos \left( \frac{U_1 B_o'}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B_o'} - \frac{U_2^2 B_o''^2}{4U_1 I_1 B_o'} \right), \quad (8)$$

$$\varphi_1 = \arccos \left( \frac{U_1 B_o'}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B_o'} - \frac{U_2^2 B_o''^2}{4U_1 I_1 B_o'} \right) - 90^\circ, \quad (9)$$

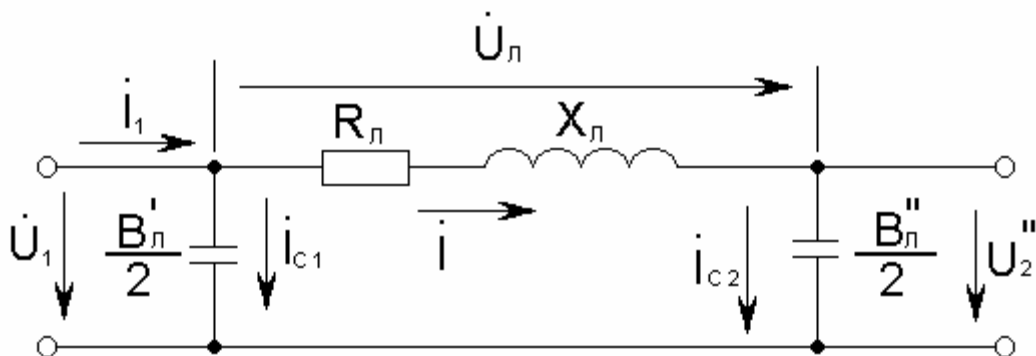


Рисунок 1 - Схема замещения ВЛ 110 кВ.

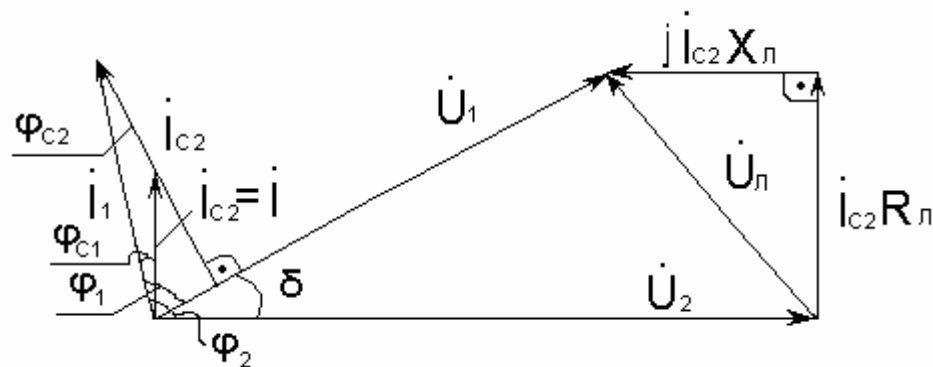


Рисунок 2 - Векторная диаграмма ВЛ 110 кВ в режиме холостого хода.

$$\cos\varphi_1 = \cos[\arccos(\frac{U_1 B'_o}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_o} - \frac{U_2^2 B_o'^2}{4U_1 I_1 B'_o}) - 90^\circ]. \quad (10)$$

Остальные параметры режима могут быть найдены на основе известных соотношений:

$$\cos\varphi_2 = \cos(-90^\circ) = 0, \quad \sin\varphi_2 = \sin(-90^\circ) = -1, \quad (11)$$

$$S_1 = U_1 I_1; \quad S_2 = U_2 I_2 = 0, \quad (12)$$

$$P_1 = S_1 \cos\varphi_1; \quad P_2 = S_2 \cos\varphi_2 = 0; \quad (13)$$

$$Q_1 = S_1 \sin\varphi_1; \quad Q_2 = S_2 \sin\varphi_2 = 0. \quad (14)$$

(Здесь  $P_1, P_2, Q_1, Q_2, S_1, S_2$  - активные, реактивные и полные мощности).

Приведенные положения доказывают теоретическую возможность определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжением 110 кВ (активной, реактивной, полной мощности и  $\cos\varphi$ ) только по измерениям тока и напряжения при известных или измеренных активных и реактивных сопротивлениях модели. Это позволяет упростить расчетные столы переменного тока, поскольку отпадает необходимость комплектации их приборами для измерения активной, реактивной, полной мощности и фазы, а величины  $\varphi_1, \cos\varphi_1, S_1, P_1, Q_1$  при известных величинах  $V_л', V_л''$ , и  $I_1, I_2, I_3$  (рисунок 1) могут быть вычислены на ПЭВМ.

Разработанный способ определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжением 110 кВ позволит повысить качество преподавания дисциплины «Теория моделирования электрических сетей».

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ ПОД НАГРУЗКОЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ИЗМЕРЕНИЯХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Р.Н. Воробьев – аспирант, Н.П. Воробьев – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
(г. Барнаул)

Схема замещения линии электропередачи под нагрузкой дополнена следующими компонентами:  $R_T, X_T, R_H, X_H$  - соответственно активные и индуктивные сопротивления силового трансформатора и нагрузки. На рисунке 1 под  $Z_л$  обозначено комплексное сопротивление линии. Векторные диаграммы напряжений и токов приведенной ВЛ, соответствующие различным по характеру нагрузкам, даны на рисунке 2, 3, 4, причем на двух последующих рисунках приведены только фрагменты векторных диаграмм, доказывающие правильность выведенных аналитических соотношений для определения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Из рисунка 2, 3, 4 следует, что при всех возможных изменениях нагрузки для определения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  пригодны следующие соотношения:  $\varphi_2=90^\circ-\varphi_{12}$ ,  $\varphi_1=90^\circ-\varphi_{11}$ .

Следовательно, имеем:

$$\cos \varphi_{11} = \frac{I_1^2 + I_{C1}^2 - I^2}{2I_1 I_{C1}}, \quad (1)$$

где

$$I_{C1} = U_1 \frac{B'_{Л}}{2}, \quad (2)$$

$$I = \frac{U_{Л}}{Z_{Л}}, \quad (3)$$

то есть:

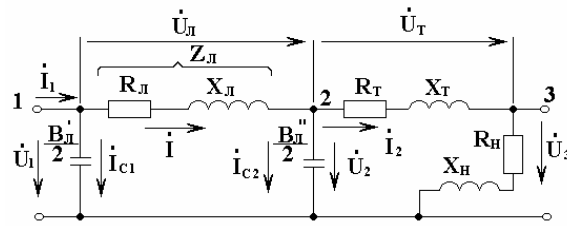


Рисунок 1

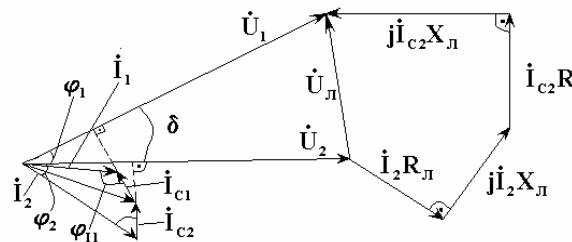


Рисунок 2

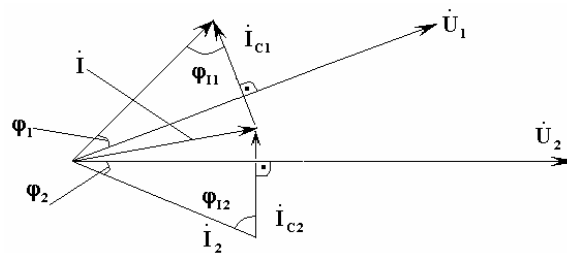


Рисунок 3

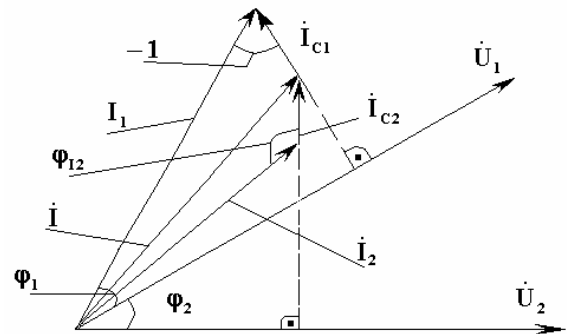


Рисунок 4

$$\cos \varphi_{11} = \frac{U_1 B'_{Л}}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_{Л}} - \frac{U_{Л}^2}{I_1 U_1 B'_{Л} Z_{Л}^2}, \quad (4)$$

$$\varphi_{11} = \arccos\left(\frac{U_1 B'_{\mathcal{L}}}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_1 U_1 B'_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right), \quad (5)$$

$$\varphi_1 = -90^\circ + \arccos\left(\frac{U_1 B'_{\mathcal{L}}}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_1 U_1 B'_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right), \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{12} = \frac{I_2^2 + I_{C2}^2 - I^2}{2I_2 I_{C2}}, \quad (7)$$

где

$$I_{C2} = U_2 \frac{B''_{\mathcal{L}}}{2}, \quad (8)$$

$$I = \frac{U_{\mathcal{L}}}{Z_{\mathcal{L}}}, \quad (9)$$

поэтому:

$$\cos \varphi_{12} = \frac{U_2 B''_{\mathcal{L}}}{4I_2} + \frac{I_2}{U_2 B''_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_2 U_2 B''_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}, \quad (10)$$

$$\varphi_{12} = \arccos\left(\frac{U_2 B''_{\mathcal{L}}}{4I_2} + \frac{I_2}{U_2 B''_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_2 U_2 B''_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right), \quad (11)$$

$$\varphi_2 = 90^\circ - \left[\arccos\left(\frac{U_2 B''_{\mathcal{L}}}{4I_2} + \frac{I_2}{U_2 B''_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_2 U_2 B''_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right)\right], \quad (12)$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (13)$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\left[-90^\circ + \arccos\left(\frac{U_1 B'_{\mathcal{L}}}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_1 U_1 B'_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right)\right], \quad (14)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (15)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\left[90^\circ - \arccos\left(\frac{U_2 B''_{\mathcal{L}}}{4I_2} + \frac{I_2}{U_2 B''_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_2 U_2 B''_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right)\right], \quad (16)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1, \quad (17)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin\left[-90^\circ + \arccos\left(\frac{U_1 B'_{\mathcal{L}}}{4I_1} + \frac{I_1}{U_1 B'_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_1 U_1 B'_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right)\right], \quad (18)$$

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2, \quad (19)$$

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin\left[90^\circ - \arccos\left(\frac{U_2 B''_{\mathcal{L}}}{4I_2} + \frac{I_2}{U_2 B''_{\mathcal{L}}} - \frac{U_{\mathcal{L}}^2}{I_2 U_2 B''_{\mathcal{L}} Z_{\mathcal{L}}^2}\right)\right], \quad (20)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}, \quad (21)$$

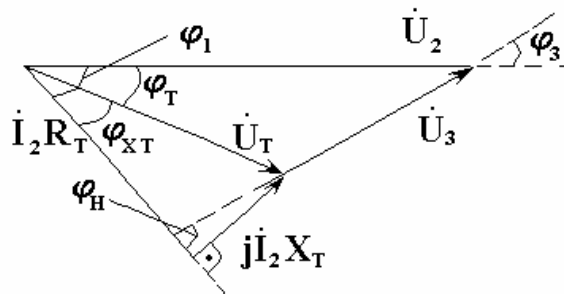


Рисунок 5 - Векторная диаграмма к рисунку 1

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}. \quad (22)$$

Для определения параметров режима на нагрузке построим векторную диаграмму токов и напряжений для точек 2 и 3 по рисунку 1. Из рисунка 5 следует, что:

$$\dot{U}_2 = U_2 + j0, \quad \varphi_T = -\varphi_2 + \varphi_{XT}, \quad (23)$$

$$\dot{U}_T = U_T e^{j(-\varphi_2 + \varphi_{XT})} = U_T e^{j(-\varphi_2 + \arctg \frac{X_T}{R_T})}, \quad (24)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_2 - \dot{U}_T = [U_2 - U_T \cos(-\varphi_2 + \arctg \frac{X_T}{R_T}) + j[0 - U_T \sin(-\varphi_2 + \arctg \frac{X_T}{R_T})] = a + jb. \quad (25)$$

Величину  $\varphi_3$  определим, пользуясь соотношением:

$$\varphi_3 = \begin{cases} \arccos \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} & \text{при } b \geq 0, \\ -\arccos \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} & \text{при } b < 0. \end{cases} \quad (26)$$

Следовательно:

$$\varphi_H = -\varphi_3 + \varphi_2, \quad P_H = U_3 I_2 \cos \varphi_H, \quad (27)$$

$$Q_H = U_3 I_2 \sin \varphi_H, \quad S_H = U_3 I_2. \quad (28)$$

Приведенные положения позволяют упростить расчетные столы переменного тока, поскольку отпадает необходимость комплектации их приборами для измерения активной, реактивной, полной мощности и фазы (измерение соответствующих величин  $\varphi_1, \varphi_2, P_1, P_2, Q_1, Q_2, S_1, S_2, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \cos \varphi_H, P_H, Q_H, S_H, \varphi_H, \varphi_T, \varphi_3$  по результатам измерений  $U_L, U_1, U_2, U_3, U_T, I_1, I_2$  при известных величинах  $B_L', B_L'', Z_L, R_T, X_T$  (рисунок 1) можно заменить вычислениями их на ЭВМ).

Разработанный способ определения параметров режима модели электрической сети переменного тока напряжение 110 кВ позволит повысить качество преподавания дисциплины «Теория моделирования электрических сетей».