

Расчет напряжений и потокораспределения мощностей в сложных электрических системах при нормальном режиме.

I.

Задачей настоящей работы является рассмотрение вопроса о современном состоянии способов и методов расчета напряжений и потокораспределения мощностей в сложных электрических системах. Вместе с тем предлагается, еще не освещенный в печати, способ использования уже известного ранее в практике расчетов низковольтных сетей метода узловых уравнений при расчетах напряжений и потокораспределения в сложных высоковольтных системах.

Сложной электрической системой называют совокупность электрических станций и подстанций, связанных высоковольтными линиями передачи. Связывая отдельные станции и подстанции, высоковольтные линии передач, как правило, образуют замкнутые контуры, которые в совокупности можно назвать высоковольтной сетью сложных электрических систем.

Расчет сетей сложных систем, естественно, усложняется необходимостью учитывать самоиндукцию и емкость линий, т. к. линии выполняются, как правило, воздушными, имеющими преобладающим индуктивное сопротивление, а высокие напряжения, применяемые в настоящее время для передачи эл. энергии, определяют весьма значительные емкостные токи.

Но не это последнее обстоятельство создает трудности при расчетах сетей сложных систем.

Как известно, учет емкостных и индуктивных слагающих общих сопротивлений линий не вносит принципиальных изменений в методы расчетов сетей, а лишь усложняет процесс расчета. Новое в задачу вносится отпавшими условиями расчетов: задаются нагрузки в питательных узлах и требуется найти напряжения в этих и других узлах; в то время, как при расчетах обычных распределительных сетей наоборот: задаются напряжения в питательных узлах и требуется найти нагрузки этих и других узлов.

Однако и при такой постановке вопроса задача могла бы быть легко разрешена известным методом узловых уравнений—точно и методом трансформации—приближенно, если бы нагрузки в узлах были заданы в токах. Легко видеть, что это последнее невозможно, хотя бы уже по одному тому, что напряжения, определяющие вместе с токами мощности в узлах, являются искомыми величинами.

Таким образом, составить баланс токов для каждого узла сети в этом случае нельзя. Можно составить баланс мощностей, но в результате этого получается, относительно напряжений узлов, система уравнений второго порядка. Точное решение системы уравнений второго порядка—процесс очень сложный и настолько трудоемкий, что эта, в принципе столь простая задача, практически является неразрешимой, по крайней мере, имея в виду абсолютно точное решение ее.

Не трудно показать, что всякое точное решение задачи о расчете напряжений и потокораспределения в сложных системах, какими бы мето-

дами оно ни проводилось, в конечном счете приведет к системе уравнений второго порядка. И следовательно, на пути каждого точного решения встретятся указанные выше трудности, связанные с разрешением системы уравнений второго порядка.

Избегая эту трудность, практика расчетов, в первую очередь в Америке, пошла по линии создания моделей сложных систем, на которых, подбирая из омических, индуктивных и емкостных сопротивлений схему замещения рассчитываемой системы, находят распределение мощностей в отдельных звеньях системы и напряжения в узлах, отличающих таковые от действительных на определенный масштаб.

Такой способ расчета систем в последнее время получает широкое распространение как за границей, так и у нас в СССР, подчеркивая тем самым несомненные преимущества этого способа расчетов перед другими.

Однако, пользоваться моделями сетей могут лишь отдельные проектные и производственные единицы, т. к. эти модели имеют очень высокую стоимость и значительную громоздкость. Вот почему искания способов и методов расчета сложных систем, не прибегая к помощи расчетных моделей, не ослабились в последнее время, и нужно полагать, в конце концов, закончатся эти искания рядом вполне удовлетворительных решений задачи. Но, как было сказано выше, эти решения видимо неизбежно должны быть связаны с рядом допущений, и, следовательно, результаты этих решений, сколь угодно близко приближаясь к истинному значению искомых величин, тем не менее, всегда будут отличаться от значения последних. Это утверждение тем более справедливо, что разрешение системы уравнений второго порядка безусловно всегда будет сложнее разрешения системы уравнений первого порядка, а последнее, особенно при значительном числе узлов в системе, уже приводит к громоздким выкладкам, которых практика расчетов сетей сложных систем будет при первой возможности избегать.

До самого последнего времени можно было отметить лишь два предложения по расчету напряжений и потокораспределения в сложных системах, опубликованных в печати. Это, во-первых, метод расчета, получивший распространение в системе МОГЭС и описанный в журн. „Электричество“ за 1932 г. инж. Баскаковым и Соловьевым, а затем дополненный инж. Баскаковым в 1934 г. Этот метод расчета систем является приближенным методом, использующим очень удачно понятие средней мощности линии; имея в виду отмеченную выше трудность получения точного решения задачи, нужно признать, что метод средних мощностей является методом сравнительно простым и удобным и в то же время дает точность расчетов, в очень большом числе случаев, достаточную для практических целей. Это, во-вторых, предложение инж. Певзнера рассчитывать замкнутые сети сложных систем как радиальные, с последующим наложением дополнительных мощностей, получающихся за счет разности потенциалов в месте сечения сети, при расчете последней, как сети разомкнутой. Практического опробования последний метод еще не получил, и в настоящий момент нельзя сказать, чтобы этот метод получил распространение хотя бы в пределах одной какой-либо организации.

В самое последнее время вышла из печати книга, написанная проф. А. А. Глазуновым совместно с проф. А. Я. Рябковым и доц. Ф. П. Лашковым, в которой авторы очень подробно и обстоятельно излагают возможные способы и порядок расчета сетей энергетических систем, при чем основным методом расчета сложных систем рекомендуется модернизированный авторами (если так можно выразиться) метод трансформации сетей.

Забегая несколько вперед, нужно отметить, что метод преобразования сложных сетей в простые или т. н. метод трансформации сетей, является основным методом расчета низковольтных сетей. Если этот метод прямо

приложить к расчету сложных систем, то нужно сделать, по крайней мере, два существенных допущения: это, во-первых, принять П-образную схему замещения для линий сложных систем и, следовательно, неизменность величины тока вдоль всей линии (что является в огромном большинстве случаев вполне допустимым) и, во-вторых, выразить нагрузки в узлах, заданные, как правило в мощностях,—в токах, приняв предварительно во всех узлах сети какие-то предположительные значения напряжений или во всех узлах одно и то же какое-то среднее напряжение (напр., номинальное напряжение сети). При последней операции, т. е. при выражении нагрузок в токах, во многих случаях получается неточность, приводящая к результатам расчета сети, в значительной степени не соответствующим действительности и потому не могущим быть использованными для теоретических и практических целей.

Проф. А. А. Глазунов и др. в упомянутой выше книге доказали, что трансформацию сетей энергетических систем можно производить и в том случае, когда нагрузки в узлах выражены в мощностях. Допущения, которые приходится сделать пользуясь методом трансформации для расчета сетей сложных систем, делают этот метод расчета приближенным, но ошибки в результатах расчетов, как это показано на примерах далее, получаются в размерах, позволяющих использовать этот метод расчета сложных систем в большинстве случаев практических расчетов. Метод трансформации в этом новом своем качестве не уступает по точности результатов расчета методу средних мощностей, в то же время имеет ряд преимуществ перед ним с точки зрения техники расчетов.

В настоящей работе предлагается, напротив, не отказываться от решения основных узловых уравнений, а это решение получить косвенным путем, при чем этим способом может быть получена точность решения задачи любого порядка. Это предложение, не претендуя исключить упомянутые выше методы разрешения задачи, тем не менее в некоторых случаях может оказаться единственно возможным способом получения результатов расчета напряжений и нагрузок в сложных системах, очень близко приближающихся к истинным.

Настоящая работа, как и другие, подобные ей, посвященные расчету сложных систем, вызываются к жизни огромным ростом сложных электрических систем в Союзе как в части объединяемых ими мощностей, так и в части протяженности сетей этих сложных систем. Оправданием появления предлагаемой работы может также служить указание проф. А. А. Глазунова, сделанное им в частном письме, о том, что: „вопросы расчета электрических сетей систем только начаты разработкой и потому всякая работа, дающая что-нибудь новое в этой области, имеет большое значение“.

В заключение вводной части нужно уточнить некоторую терминологию, которой здесь приходится пользоваться, а также указать на то, что во всей работе рассматривается лишь нормальный режим сложных систем.

Понятие „сложные системы“ включает в себя совокупность станций, подстанций и линий передач; понятие „сети сложных систем“ включает в себя только лишь совокупность линий передач, связывающих станции и подстанции. По аналогии с расчетом низковольтных распределительных сетей можно говорить о расчете „сетей сложных систем“, поскольку здесь идет речь также о нахождении потокораспределения в сети.

Но расчет „сетей сложных систем“ или иначе „сетей энергетических систем“ имеет ту особенность, что этот расчет, с одной стороны, задан состоянием станций—отдаваемой мощностью их, с другой стороны, этот же расчет определяет рабочее состояние станции—рабочее напряжение. Кроме того, так как напряжение в питающих узлах сети сложной системы зависит от падения напряжения в магистралях, подводящих энергию от станций

к узлам, то в расчет включаются и эти магистрали. Таким образом, здесь как будто можно говорить о расчете напряжений, потокораспределения и нагрузок системы в целом. Нужно только оговориться о том, что речь идет о расчете напряжений и потокораспределения в сложных системах при нормальном режиме, т. е. здесь исключается рассмотрение условий короткого замыкания и устойчивости параллельной работы.

II.

Из всех методов расчета сетей метод узловых уравнений является безусловно наиболее общим методом расчета. Суть метода заключается в составлении, по закону Кирхгофа, системы уравнений равновесия токов в узлах сети. Выражая нагрузки по звеньям сети через напряжения и постоянные звеньев, получают систему уравнений с неизвестными напряжениями в узлах.

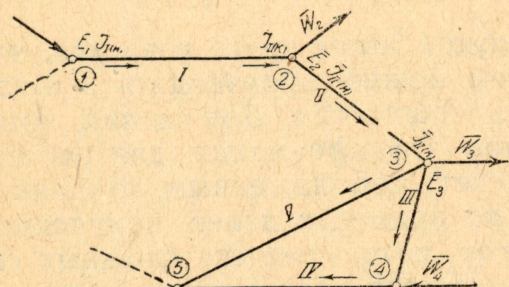


Рис. 1.

Имея в виду, что условие равновесия токов каждого узла сети можно толковать, как условие равновесия мощностей, притекаемых к узлу и отбираемых от него, можно в самом общем случае применить метод узловых уравнений и к расчету сложных систем.

Пусть рис. 1 представляет часть сети сложной системы, тогда для узла „2“ можно написать условие равновесия мощностей в виде:

$$\bar{W}_{I(\kappa)} - \bar{W}_{II(\kappa)} = \bar{W}_2 \dots \dots \dots (1)$$

Здесь: $\bar{W}_{I(\kappa)}$ — мощность в конце I-го звена,
 $\bar{W}_{II(\kappa)}$ — мощность в начале II-го звена.

Напряжения и токи начала и конца каждого звена и например звеньев 1 и 2-го связаны уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{A}_1 \cdot \bar{E}_2 + \bar{B}_1 \cdot \bar{J}_{I(\kappa)} \\ \bar{J}_{I(\kappa)} &= \bar{C}_1 \cdot \bar{E}_2 + \bar{D}_1 \cdot \bar{J}_{I(\kappa)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

— для звена I-го и

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_2 &= \bar{A}_{II} \cdot \bar{E}_3 + \bar{B}_{II} \cdot \bar{J}_{II(\kappa)} \\ \bar{J}_{II(\kappa)} &= \bar{C}_{II} \cdot \bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{J}_{II(\kappa)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

— для звена II-го.

Из первого уравнения, выражения (2), найдем

$$\bar{J}_{I(\kappa)} = \frac{\bar{E}_1 - \bar{A}_1 \cdot \bar{E}_2}{\bar{B}_1}$$

и

$$\bar{W}_{I(\kappa)} = \bar{J}_{I(\kappa)} \cdot \bar{E}_2 = \frac{\bar{E}_2 (\bar{E}_1 - \bar{A}_1 \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_1} \dots \dots \dots (4)$$

Затем из уравнений, выражения (3), получим:

$$\bar{J}_{II(\kappa)} = \frac{(\bar{C}_{II} \cdot \bar{B}_{II} - \bar{A}_{II} \cdot \bar{D}_{II}) \cdot \bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \bar{E}_2}{\bar{B}_{II}};$$

Выражение

$$\bar{C}_{II} \cdot \bar{B}_{II} - \bar{A}_{II} \cdot \bar{D}_{II} = -1$$

и потому

$$\bar{J}_{II(n)} = \frac{-\bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{E}_2}{\bar{B}_{II}}$$

и, следовательно,

$$\bar{W}_{II(n)} = \frac{\hat{E}_2 \cdot (-\bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_{II}} \dots \dots \dots (5)$$

Теперь узловое уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\hat{E}_2 (\bar{E}_1 - \bar{A}_I \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_I} - \frac{\hat{E}_2 (-\bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_{II}} = \bar{W}_2 \dots \dots (6)$$

Уравнения, подобные (6), можно составить для всех узлов системы; однако, имея в виду возможность положить напряжение одного узла известным, можно ограничиться $(n-1)$ уравнением, если число узлов обозначить через „ n “. Исключение уравнения одного из узлов и притом обязательно узла питающего, необходимо еще и потому, что нагрузка может быть известна всех узлов системы, за исключением хотя бы одного, т. к. потери в сети системы являются пока неизвестными.

Итак, для любой сложной системы можно составить $(n-1)$ уравнений, с $(n-1)$ неизвестными напряжениями.

Разрешая эту систему уравнений, найдем напряжения, а затем уже очень просто и потоки мощностей в звеньях.

Необходимо отметить общность уравнения (6). Подобно уравнениям (2) и (3), представляющими связь в общем виде между напряжениями и токами линии передачи,—уравнение (6) связывает в общем виде электрическое состояние двух соседних звеньев сети сложной системы. Вид уравнения (6) не изменяется в том случае, когда в узле сопрягаются несколько звеньев (больше 2-х); в этом случае лишь в левой части его добавляются новые члены, представляющие каждый дополнительные звенья.

Таким образом, метод узловых уравнений является общим методом расчета электрического состояния замкнутых электрических систем. И определение напряжений и потокораспределения мощностей в сложных системах сводится, т. о., к решению системы узловых уравнений. Однако, здесь-то и получают затруднения, ибо легко видеть, это будет система уравнений 2-го порядка, а систему уравнений 2-го порядка разрешать прямым путем—задача чрезвычайно трудная.

Система узловых уравнений может быть сравнительно просто решена косвенным путем, если нагруженное состояние электрической системы рассматривать, как результат наложения (суперпозиции) нескольких частичных состояний, из которых первое представляется произвольно выбранными токами нагрузки в узлах, большими или меньшими действительных, и последующих—токами, постепенно дополняющими ток каждого узла до его действительного значения, соответствующего заданной мощности в узле и напряжению, подсчитанному для предыдущего частичного состояния.

Каждая ступень нагрузки системы, будучи представлена определенными токами в узлах, позволяет помощью узловых уравнений находить просто напряжения, соответствующие данной ступени нагрузки; здесь приходится иметь дело с системой линейных уравнений, решение которой не вызывает особых затруднений.

Пусть сложная система (рис. 1) нагружается в $(n-1)$ узле произвольными токами:

$$\bar{J}'_2, \bar{J}'_3, \bar{J}'_4 \dots \dots \dots \text{и т. д.}$$

Тогда электрическое состояние системы можно выразить совокупностью уравнений, согласно (6),

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\bar{E}_1 - \bar{A}_I \cdot \bar{E}_2}{\bar{B}_I} - \frac{-\bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{E}_2}{\bar{B}_{II}} = \bar{J}'_2 \\ & \frac{\bar{E}_2 - \bar{A}_{II} \cdot \bar{E}_3}{\bar{B}_{II}} - \frac{-\bar{E}_4 + \bar{D}_{III} \cdot \bar{E}_3}{\bar{B}_{III}} - \frac{\bar{E}_5 + \bar{D}_V \cdot \bar{E}_3}{\bar{B}_V} = \bar{J}'_3 \\ & \frac{\bar{E}_3 - \bar{A}_{III} \cdot \bar{E}_4}{\bar{B}_{III}} - \frac{-\bar{E}_5 + \bar{D}_{IV} \cdot \bar{E}_4}{\bar{B}_{IV}} = -\bar{J}'_4 \\ & \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

Разрешив уравнения (7), способом ли подстановки и исключения, или способом детерминантов,—получим выражения для напряжений в узлах в виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}'_1 &= \bar{E}_{10} + \bar{K}_{21} \cdot \bar{J}'_2 + \bar{K}_{31} \bar{J}'_3 + \bar{K}_{41} \cdot (-\bar{J}'_4) + \dots \\ \bar{E}'_2 &= E_2 = \text{const} \dots \dots \dots (\text{принимается известным}) \\ \bar{E}'_3 &= \bar{E}_{30} + \bar{K}_{23} \cdot \bar{J}'_2 + \bar{K}_{33} \cdot \bar{J}'_3 + \bar{K}_{43} \cdot (-\bar{J}'_4) + \dots \\ \bar{E}'_4 &= \bar{E}_{40} + \bar{K}_{24} \cdot \bar{J}'_2 + \bar{K}_{34} \cdot \bar{J}'_3 + \bar{K}_{44} \cdot (-\bar{J}'_4) + \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots (8)$$

В выражении (8):

$\bar{E}_{10}, \bar{E}_{30}, \bar{E}_{40} \dots$ и т. д. — истинные значения напряжений в узлах при холостом ходе системы, т. е. когда $\bar{J}_2, \bar{J}_3, \bar{J}_4 \dots$ и т. д. $= 0$ а $\bar{J}_1 \neq 0$. $\bar{K}_{21}, \bar{K}_{23}, \bar{K}_{24}$ и т. д. коэффициенты, зависящие от постоянных звеньев сети системы; значки при коэф. указывают на отношение к соответствующим току и напряжению.

$\bar{J}_4$ взято с минусом потому, что узел 4-й является узлом питающим.

Напряжение 2-го узла (можно было бы выбрать любой другой узел) принято постоянным и совпадающим с осью действительных величин.

Мощности в узлах, соответствующие принятым токовым нагрузкам в узлах и найденным, из выражения (8), напряжениям, будут:

$$\left. \begin{aligned} \overline{W}_2 &= \overline{J}_2 \cdot E_2 \\ \overline{W}'_3 &= \overline{J}'_3 \cdot \hat{E}'_3 \\ \overline{W}'_4 &= \overline{J}'_4 \cdot \hat{E}'_4 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

И Т. Д.

Таким образом, система не перегружена (или перегружена) в каждом узле на мощность, являющуюся разностью между действительной мощностью узлов и подсчитанной по выражению (8), т. е.

во 2-м узле на $\bar{W}_2 - \bar{W}'_2$,

в 3-м узле на $\bar{W}_3 - \bar{W}'_3$,

И Т. Д. ИЛИ В ТОКАХ:

на

$$\frac{\bar{W}_2 - \bar{W}'_2}{E_2} = \bar{i}'_2 (= 0),$$

на

$$\frac{\bar{W}_3 - \bar{W}'_3}{\hat{E}'_3} = \bar{i}'_3$$

.....

и т. д.

Эти недостающие токи $\bar{i}'_2, \bar{i}'_3, \bar{i}'_4$ и т. д. добавим соответственно к токам нагрузки первой ступени и получим нагрузки в токах второй ступени приближения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{J}''_2 &= \bar{J}_2 + \bar{i}'_2 \\ \bar{J}''_3 &= \bar{J}_3 + \bar{i}'_3 \\ \bar{J}''_4 &= \bar{J}_4 + \bar{i}'_4 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

.....

и т. д.

Но, как нетрудно убедиться, эти же токи нагрузок могут быть получены прямо от деления действительных мощностей в узлах на напряжения первой ступени приближения. В самом деле:

$$\left. \begin{aligned} \bar{J}''_2 &= \bar{J}_2 + \bar{i}'_2 = \frac{\bar{W}'_2}{E_2} + \frac{\bar{W}_2 - \bar{W}'_2}{E_2} = \frac{\bar{W}_2}{E_2} \\ \bar{J}''_3 &= \bar{J}_3 + \bar{i}'_3 = \frac{\bar{W}'_3}{\hat{E}'_3} + \frac{\bar{W}_3 - \bar{W}'_3}{\hat{E}'_3} = \frac{\bar{W}_3}{\hat{E}'_3} \\ \bar{J}''_4 &= \bar{J}_4 + \bar{i}'_4 = \frac{\bar{W}'_4}{\hat{E}'_4} + \frac{\bar{W}_4 - \bar{W}'_4}{\hat{E}'_4} = \frac{\bar{W}_4}{\hat{E}'_4} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

Нагружая систему новыми токами $\bar{J}''_2, \bar{J}''_3, \bar{J}''_4$ и т. д. получим соответственно новые значения напряжений в узлах $\bar{E}''_1, \bar{E}''_3, \bar{E}''_4$ и т. д.

Совершенно очевидно, что с каждой новой ступенью пересчета, мы все ближе и ближе будем подходить к истинным значениям напряжений в узлах.

Как показано будет дальше, приближение к истинным значениям напряжений получается очень быстро, и уже третья ступень приближения дает значения напряжений, отличающихся от истинных на доли или десятые доли процента.

III.

Покажем на примере применение метода узловых уравнений к расчету

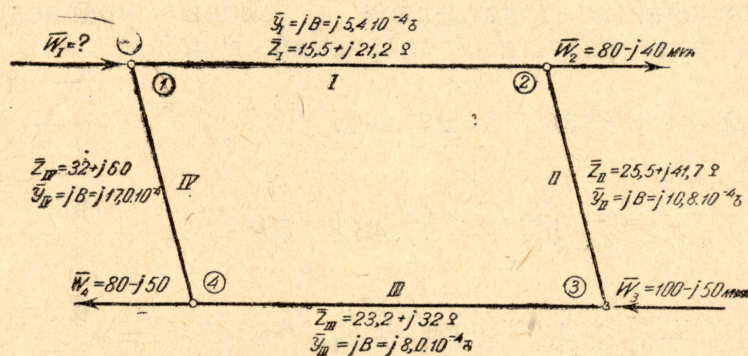


Рис. 2.

напряжений и потокораспределения в сложной системе. Пусть мы имеем систему, заданную рис. 2.

Составим для заданного примера систему узловых уравнений согласно (6):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\hat{E}_2(\bar{E}_1 - \bar{A}_I \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_I} - \frac{\hat{E}_2(-\bar{E}_3 + \bar{D}_{II} \cdot \bar{E}_2)}{\bar{B}_{II}} &= \bar{W}_2 \\ \frac{\hat{E}_3(\bar{E}_2 - \bar{A}_{II} \cdot \bar{E}_3)}{\bar{B}_{II}} - \frac{\hat{E}_3(-\bar{E}_4 + \bar{D}_{III} \cdot \bar{E}_3)}{\bar{B}_{III}} &= -\bar{W}_3 \\ \frac{\hat{E}_4(\bar{E}_3 - \bar{A}_{III} \cdot \bar{E}_4)}{\bar{B}_{III}} - \frac{\hat{E}_4(-\bar{E}_1 + \bar{D}_{IV} \cdot \bar{E}_4)}{\bar{B}_{IV}} &= \bar{W}_4 \end{aligned} \right\}$$

или:

$$\left. \begin{aligned} \bar{B}_{II} \cdot \bar{E}_1 - (\bar{A}_I \cdot \bar{B}_{II} + \bar{B}_I \cdot \bar{D}_{II}) \cdot \bar{E}_2 + \bar{B}_I \cdot \bar{E}_3 &= \frac{\bar{W}_2}{\hat{E}_2} \cdot \bar{B}_I \cdot \bar{B}_{II} \\ \bar{B}_{III} \cdot \bar{E}_2 - (\bar{A}_{II} \cdot \bar{B}_{III} + \bar{B}_{II} \cdot \bar{D}_{III}) \cdot \bar{E}_3 + \bar{B}_{II} \cdot \bar{E}_4 &= -\frac{\bar{W}_3}{\hat{E}_3} \cdot \bar{B}_{II} \cdot \bar{B}_{III} \\ \bar{B}_{IV} \cdot \bar{E}_3 - (\bar{A}_{III} \cdot \bar{B}_{IV} + \bar{B}_{III} \cdot \bar{D}_{IV}) \cdot \bar{E}_4 + \bar{B}_{III} \cdot \bar{E}_1 &= \frac{\bar{W}_4}{\hat{E}_4} \cdot \bar{B}_{III} \cdot \bar{B}_{IV} \end{aligned} \right\}$$

Положив, далее, в основу П-образную схему замещения, подсчитаем постоянные $\bar{A}$, $\bar{B}$ и $\bar{D}$, по формулам:

$$\bar{A} = 1 + \frac{\bar{y} \cdot \bar{Z}}{2},$$

$$\bar{B} = \bar{Z}$$

$$\bar{D} = 1 + \frac{\bar{y} \cdot \bar{Z}}{2} = A^{(*)}$$

Результаты подсчетов сведены в таблицу 1.

Таблица № 1.

Звено	$\bar{A}$	$\bar{B}$
I	0,994 $\angle 14'$	26,2 $\angle 54^\circ$
II	0,977 $\angle 48'$	48,8 $\angle 58^\circ 30'$
III	0,987 $\angle 32'$	39,6 $\angle 54^\circ$
IV	0,949 $\angle 1^\circ 38'$	67,8 $\angle 61^\circ 54'$

Значения постоянных подставляем в узловые уравнения и получаем окончательно систему расчетных уравнений, в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{E}_1 \cdot 48,8 \angle 58^\circ 30' - \bar{E}_2 \cdot 74,07 \angle 57^\circ 23' + \bar{E}_3 \cdot 26,2 \angle 54^\circ &= \frac{\bar{W}_2}{\hat{E}_2} \cdot 1278 \angle 112^\circ 30' \\ \bar{E}_2 \cdot 39,6 \angle 54^\circ - \bar{E}_3 \cdot 86,7 \angle 57^\circ 7' + \bar{E}_4 \cdot 48,8 \angle 58^\circ 30' &= -\frac{\bar{W}_3}{\hat{E}_3} \cdot 1932 \angle 112^\circ 30' \\ \bar{E}_3 \cdot 67,8 \angle 61^\circ 54' - \bar{E}_4 \cdot 104,1 \angle 60^\circ 0' + \bar{E}_1 \cdot 39,6 \angle 54^\circ &= \frac{\bar{W}_4}{\hat{E}_4} \cdot 2685 \angle 115^\circ 54' \end{aligned} \right.$$

Напряжение в узле „2“ положим известным и равным 105 кв.

*) $\bar{A}$ и $\bar{D}$ равны в нашем частном случае, где П-образная схема замещения симметрична.

Полагая токовые нагрузки в узлах известными, решим систему уравнений относительно напряжений $\bar{E}_1$, $\bar{E}_3$ и $\bar{E}_4$. Решение проведем помощью определителей, для чего напишем систему 3-х полных линейных уравнений в общем виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_{11} \cdot \bar{E}_1 + \bar{a}_{13} \cdot \bar{E}_3 + \bar{a}_{14} \cdot \bar{E}_4 &= \bar{b}_1 \\ \bar{a}_{21} \cdot \bar{E}_1 + \bar{a}_{23} \cdot \bar{E}_3 + \bar{a}_{24} \cdot \bar{E}_4 &= \bar{b}_2 \\ \bar{a}_{31} \cdot \bar{E}_1 + \bar{a}_{33} \cdot \bar{E}_3 + \bar{a}_{34} \cdot \bar{E}_4 &= \bar{b}_3 \end{aligned} \right\}$$

и решения этой системы уравнений через определители:

$$\bar{E}_1 = \frac{\bar{\Delta}_{11}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_1 + \frac{\bar{\Delta}_{21}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_2 + \frac{\bar{\Delta}_{31}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_3;$$

$$\bar{E}_3 = \frac{\bar{\Delta}_{12}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_1 + \frac{\bar{\Delta}_{22}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_2 + \frac{\bar{\Delta}_{32}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_3;$$

$$\bar{E}_4 = \frac{\bar{\Delta}_{13}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_1 + \frac{\bar{\Delta}_{23}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_2 + \frac{\bar{\Delta}_{33}}{\bar{\Delta}} \bar{b}_3;$$

Здесь: $\bar{\Delta}$ — определитель системы уравнений, в данном случае равный

$$\bar{\Delta} = \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{13} & \bar{a}_{14} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{23} & \bar{a}_{24} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{33} & \bar{a}_{34} \end{vmatrix};$$

$\bar{\Delta}_{11}$, $\bar{\Delta}_{21}$, $\bar{\Delta}_{31}$ и т. д. — адъюнкты главного определителя $\bar{\Delta}$, в данном случае, равные:

$$\bar{\Delta}_{11} = (-1)^{1+1} \cdot \begin{vmatrix} \bar{a}_{23} & \bar{a}_{24} \\ \bar{a}_{33} & \bar{a}_{34} \end{vmatrix},$$

$$\bar{\Delta}_{21} = (-1)^{2+1} \cdot \begin{vmatrix} \bar{a}_{13} & \bar{a}_{14} \\ \bar{a}_{33} & \bar{a}_{34} \end{vmatrix},$$

$$\bar{\Delta}_{31} = (-1)^{3+1} \cdot \begin{vmatrix} \bar{a}_{13} & \bar{a}_{14} \\ \bar{a}_{23} & \bar{a}_{24} \end{vmatrix},$$

и т. д.

Из сравнения системы узловых уравнений и системы 3-х линейных уравнений в общем вид имеем:

$$\bar{a}_{11} = 48,8 \angle 58^\circ 30'$$

$$\bar{a}_{13} = 26,2 \angle 54^\circ$$

$$\bar{a}_{14} = 0$$

$$\bar{a}_{31} = 39,6 \angle 54^\circ$$

$$\bar{a}_{33} = 67,8 \angle 61^\circ 54'$$

$$\bar{a}_{34} = -104,2 \angle 60^\circ 00'$$

$$\bar{a}_{21} = 0$$

$$\bar{a}_{23} = -86,7 \angle 57^\circ 7'$$

$$\bar{a}_{24} = 48,8 \angle 58^\circ 7'$$

$$\bar{b}_1 = \bar{J}_2 \cdot 1278 \angle 112^\circ 30' + 105.74,07 \angle 57^\circ 23'$$

$$\bar{b}_2 = -\bar{J}_3 \cdot 1932 \angle 112^\circ 30' - 105.39,6 \angle 54^\circ$$

$$\bar{b}_3 = \bar{J}_4 \cdot 2685 \angle 115^\circ 54' + 0$$

При чем:

$$\bar{J}_2 = \frac{\bar{W}_2}{\bar{E}_2},$$

$$\bar{J}_3 = \frac{\bar{W}_3}{\bar{E}_3},$$

$$\bar{J}_4 = \frac{\bar{W}_4}{\bar{E}_4}.$$

После подстановки значений коэффициентов при неизвестных в выражения для определителя и адъюнкт, получаем:

$$\bar{\Delta} = -329,6 \cdot 10^3 \angle -7^\circ 18';$$

$$\bar{\Delta}_{11} = 9260 \angle 117^\circ 58' - 3310 \angle 120^\circ 24';$$

$$\bar{\Delta}_{21} = 2730 \angle 114^\circ 00';$$

$$\bar{\Delta}_{31} = 1278 \angle 112^\circ 30';$$

$$\bar{\Delta}_{12} = 1932 \angle 112^\circ 30';$$

$$\bar{\Delta}_{22} = -5085 \angle 118^\circ 30';$$

$$\bar{\Delta}_{32} = -2381 \angle 117^\circ;$$

$$\bar{\Delta}_{13} = 3433 \angle 111^\circ 7';$$

$$\bar{\Delta}_{23} = -3308 \angle 120^\circ 24' + 1037 \angle 108^\circ$$

$$\bar{\Delta}_{33} = -4231 \angle 115^\circ 37'$$

Теперь выражения для неизвестных напряжений примут вид:

$$\bar{E}_1 = 100,09 \angle 1^\circ 30' + 23,05 \bar{J}_2 \angle 57^\circ 16' - 16,0 \bar{J}_3 \angle 53^\circ 48' + 10,42 \bar{J}_4 \angle 55^\circ 42'$$

$$\bar{E}_3 = 109,7 \angle -1^\circ 18' + 7,5 \bar{J}_2 \angle 52^\circ 18' - 29,79 \bar{J}_3 \angle 238^\circ 18' + 19,41 \bar{J}_4 \angle 240^\circ 12',$$

$$\bar{E}_4 = 109,5 \angle -1^\circ 12' + 13,10 \bar{J}_2 \angle 50^\circ 55' + 13,50 \bar{J}_3 \angle 65^\circ 48' + 34,36 \bar{J}_4 \angle 238^\circ 49'$$

Нагрузка в узлах:

$$\bar{W}_2 = 89,45 \angle -26^\circ 36';$$

$$\bar{W}_3 = 111,9 \angle -26^\circ 34';$$

$$\bar{W}_4 = 94,4 \angle -31^\circ 48';$$

Токи нагрузок первой ступени приближения, в предположении, что во всех узлах имеет место среднее напряжение 105 кв.:

$$\bar{J}_2 = \frac{89,45 \angle -26^\circ 36'}{105} = 0,852 \angle -26^\circ 36' \text{ KA},$$

$$\bar{J}_3 = \frac{111,9 \angle -26^\circ 34'}{105} = 1,065 \angle -26^\circ 34' \text{ KA},$$

и

$$\bar{J}_4 = \frac{94,4 \angle -31^\circ 48'}{105} = 0,899 \angle -31^\circ 48' \text{ KA}.$$

Соответствующие напряжения получаются, как:

$$\begin{aligned} \bar{E}_3 = & 109,7 \angle -1^\circ 18' + 7,50 \angle 52^\circ 18' \cdot 0,852 \angle -26^\circ 36' - \\ & - 29,79 \angle 238^\circ 18' \cdot 1,065 \angle -26^\circ 34' + 19,41 \angle 240^\circ 12' \cdot \\ & 0,899 \angle -31^\circ 48' = 127,3 \angle 3^\circ 54' \text{ KV}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{E}'_4 &= 109,5 \angle -1^\circ 12' + 13,10 \angle 50^\circ 55' \cdot 0,852 \angle -26^\circ 36' + \\ &+ 13,50 \angle 65^\circ 48' \cdot 1,065 \angle -26^\circ 34' + 34,36 \angle 238^\circ 49' \cdot \\ &\cdot 0,899 \angle -31^\circ 48' = 103,3 \angle -1^\circ 24' \text{ KV.}\end{aligned}$$

Примечание: Напряжение в первом узле $\bar{E}_1$ в предварительном подсчете не участвует, т. к. нагрузка в первом узле не дана.
Токи нагрузок второй ступени приближения:

$$\bar{J}''_2 = \bar{J}_2 = 0,852 \angle -26^\circ 36' \text{ KA.}$$

$$\bar{J}''_3 = \frac{\bar{W}_3}{\bar{E}'_3} = \frac{111,9 \angle -26^\circ 34'}{127,3 \angle -3^\circ 54'} = 0,879 \angle -22^\circ 40' \text{ KA;}$$

$$\bar{J}''_4 = \frac{\bar{W}_4}{\bar{E}'_4} = \frac{94,4 \angle -31^\circ 48'}{103,3 \angle 1^\circ 24'} = 0,914 \angle -33^\circ 12' \text{ KA;}$$

И соответствующие напряжения:

$$\bar{E}''_3 = 120,75 \angle 3^\circ 36' \text{ KV,}$$

$$\bar{E}''_4 = 100,03 \angle -1^\circ 48' \text{ KV.}$$

Подобным образом можно получить значения напряжений для 3-й, 4-й и т. д. ступеней приближения. Результаты подсчетов приведены в таблице 2.

Таблица № 2.

	С т у п е н и п р и б л и ж е н и я				
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я
Напряжен. в узле $\bar{E}_3^{(K)}$ к ✓	127,3 $\angle 3^\circ 54'$	120,75 $\angle 3^\circ 36'$	121,76 $\angle 3^\circ 30'$	121,5 $\angle 3^\circ 42'$	121,5 $\angle 3^\circ 42'$
$\frac{E_3 - E_3^{(K)}}{E_3} 100$	4,7%	1,03%	0,2%	0%	0%
$\angle \sigma_3 - \angle \sigma_3^{(K)}$	$\angle 12'$	$\angle 6'$	$\angle 12'$	$\angle 0'$	$\angle 0'$
Напряжен. в узле $\bar{E}_4^{(K)}$ к ✓	103,3 $\angle -1^\circ 24'$	100,08 $\angle -1^\circ 48'$	99,550 $\angle -1^\circ 42'$	99,4 $\angle -1^\circ 48'$	99,4 $\angle -1^\circ 48'$
$\frac{E_4 - E_4^{(K)}}{E_4} 100$	3,93%	0,68%	0,15%	0%	0%
$\angle \sigma_4 - \angle \sigma_4^{(K)}$	$\angle 24'$	$\angle 0'$	$\angle 6'$	$\angle 0'$	$\angle 0'$

Здесь:

а) $\bar{E}_3^{(K)}$ и $\bar{E}_4^{(K)}$ — напряжения данной, к-ой, ступени приближения;

в) E_3 и E_4 — истинн. значения напряжений в узлах.

Так как шестая ступень приближения дает значения напряжений, не отличающихся от таковых в случае пятой ступени приближения, то нужно считать

$$\bar{E}_3^V = 121,5 \angle 3^\circ 42' \text{ kv}$$

$$\bar{E}_4^V = 99,40 \angle -1^\circ 48' \text{ kv}$$

— за истинные значения напряжений в узлах 3-м и 4-м ²⁾

²⁾ Принимая во внимание принятую степень точности расчета.

Теперь сразу же найдем напряжение в первом узле

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 &= 100,09 \angle 1^\circ 30' + 23,05 \angle 57^\circ 16' \cdot 0,852 \angle -26^\circ 36' - \\ &- 16,00 \angle 53^\circ 48' \cdot 0,922 \angle -22^\circ 52' + 10,42 \angle 55^\circ 42' \cdot \\ &\cdot 0,950 \angle -33^\circ 36' = 113,63 \angle 4^\circ 0' \text{ kv}\end{aligned}$$

Распределение мощностей по звеньям сети сложной системы найдем, согласно выражений (4) и (5), как

$$\begin{aligned}\bar{W}_{I(\kappa)} &= \frac{-\hat{E}_1 \cdot \bar{E}_2}{\bar{B}_I} + \frac{\bar{D}_I}{\bar{B}_I} \cdot E_2^2 = \frac{-113,63 \angle -4^\circ 0' \cdot 105}{26,2 \angle 54^\circ} + \\ &+ \frac{0,994 \angle 14'}{26,2 \angle 54^\circ} \cdot 113,63^2 = 49,5 - j 8,0 \text{ mva}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{W}_{I(k)} &= \frac{\hat{E}_2 \cdot \bar{E}_1}{\bar{B}_I} - \frac{\bar{A}_I}{\bar{B}_I} \cdot E_2^2 = \frac{105 \cdot 113,63 \angle 4^\circ 0'}{26,2 \angle 54^\circ} - \\ &- \frac{0,994 \angle 14'}{26,2 \angle 54^\circ} \cdot 105^2 = 46,4 - j 12,2 \text{ mva}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{W}_{II(\kappa)} &= \frac{-\hat{E}_2 \cdot \bar{E}_3}{\bar{B}_{II}} + \frac{\bar{D}_{II}}{\bar{B}_{II}} \cdot E_2^2 = \frac{-105 \cdot 121,5 \angle 3^\circ 42'}{48,8 \angle 58^\circ 30'} + \\ &+ \frac{0,977 \angle 48'}{48,8 \angle 58^\circ 30'} \cdot 105^2 = -(33,0 - j 27,4) \text{ mva}\end{aligned}$$

$$\bar{W}_{II(k)} = \dots = -(36,0 - j 18,0) \text{ mva}$$

$$\bar{W}_{III(\kappa)} = \dots = 64,4 - j 32,5 \text{ mva}$$

$$\bar{W}_{III(k)} = \dots = 56,0 - j 30,5 \text{ mva}$$

$$\bar{W}_{IV(\kappa)} = \dots = -(24,5 - j 18,3) \text{ mva}$$

$$\bar{W}_{VI(\kappa)} = \dots = -(26,2 - j 20,7) \text{ mva}$$

Найденные напряжения в узлах и нагрузки в звеньях нанесены на схеме рис. 3.

При холостом ходе, когда

$$\bar{J}_2 = 0,$$

$$\bar{J}_3 = 0,$$

$$\bar{J}_4 = 0,$$

и

$$\bar{J}_1 \neq 0,$$

напряжения в узлах будут:

$$\bar{E}_{10} = 100,09 \angle 1^\circ 30' \text{ kv}$$

$$\bar{E}_{20} = 105 \text{ kv}$$

$$\bar{E}_{30} = 109,7 \angle -1^\circ 18' \text{ kv}$$

$$\bar{E}_{40} = 109,5 \angle -1,12' \text{ kv}$$

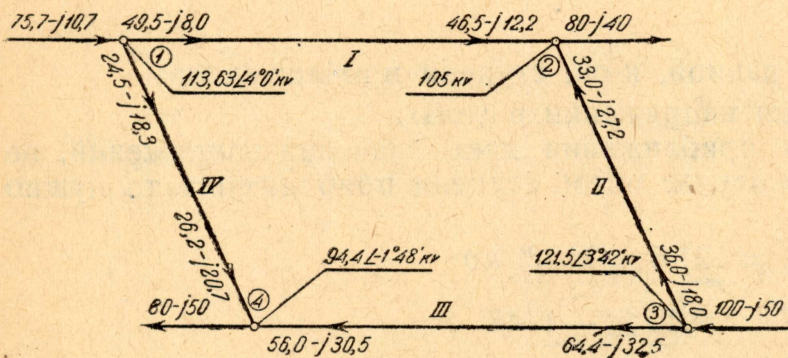


Рис. 3.

Мощность, отбираемая от первого узла и следовательно необходимая для питания всей системы на холостом ходу, получится, как:

$$\begin{aligned}\bar{W}_{I(XX)} &= -(\bar{W}_{IV(K)XX} - \bar{W}_{I(K)XX}) = \\ &= -\left[\left(\frac{\bar{E}_{10} \cdot \bar{E}_{40}}{\bar{B}_{IV}} - \frac{\bar{A}_{IV}}{\bar{B}_{IV}} \cdot E_{10}^2\right) - \left(\frac{-\bar{E}_{20} \cdot \bar{E}_{10}}{\bar{B}_I} + \frac{\bar{D}_I}{\bar{B}_I} \cdot E_{10}^2\right)\right] \\ &= -[(0,00 + j 24,3) - (19,5 + j 12,00)] = 19,50 + j 36,30 \text{ mva.}\end{aligned}$$

Необходимо отметить, что напряжения и нагрузку при XX можно было бы подсчитать и при условии питания системы одновременно в узлах 1-м и 3-м.

IV.

Во многих случаях расчеты можно вести с меньшей точностью, чем это получают, когда принимают постоянные линии распределенными или, во всяком случае, когда расчеты ведут на основе эквивалентных констант. Если положить в основание расчета П-образную схему замещения звеньев системы и емкостные токи учесть через возможное среднее напряжение в узлах системы, то весь процесс определения напряжений и нагрузок в системе по методу узловых уравнений значительно упростится, и в то же время точность расчета слишком не пострадает.

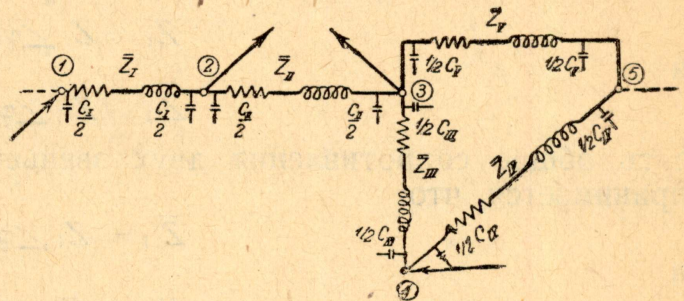


Рис. 4.

Схема замещения сложной системы, изображенной на рис. 1 будет теперь иметь вид, согласно рис. 4.

Примечание: Токи ватной проводимости, если таковыми нельзя пренебречь, можно учесть также разнесением проводимости каждого звена по его концам.

Емкостные токи по узлам учитываются в виде добавочных опережающих реактивных мощностей, прибавляемых к заданным нагрузкам в узлах. Теперь в узлах получают новые нагрузки:

$$\bar{W}'_2, \bar{W}'_3, \bar{W}'_4 \dots \dots \dots \text{и т. д.}$$

Токи в звеньях теперь не изменяются по длине звеньев и определяются как:

$$\bar{J}_I = \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{\bar{Z}_I},$$

$$\bar{J}_{II} = \frac{\bar{E}_2 - \bar{E}_3}{\bar{Z}_{II}}$$

$$\dots \dots \dots$$

и т. д.

Система узловых уравнений будет иметь вид (применительно к рис. 1 и 4)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\hat{E}_2(\bar{E}_1 - \bar{E}_3)}{\bar{Z}_I} - \frac{\hat{E}_2(\bar{E}_2 - \bar{E}_3)}{\bar{Z}_{II}} &= \bar{W}'_2 \\ \frac{\hat{E}_3(\bar{E}_2 - \bar{E}_3)}{\bar{Z}_{II}} - \frac{\hat{E}_2(\bar{E}_3 - \bar{E}_4)}{\bar{Z}_{III}} - \frac{\hat{E}_3(\bar{E}_3 - \bar{E}_5)}{\bar{Z}_V} &= \bar{W}'_3 \\ \dots \dots \dots &\dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots (12)$$

и т. д.

Дальнейшее упрощение достигается допущением равенства отношений $\frac{R}{X}$ в звеньях, сопрягающихся в данном узле. Это одинаковое отношение $\frac{R}{X}$ для всех звеньев, сопрягающихся в данном звене, берется как среднее из действительных отношений. Т. е. иначе говоря, если

$$\bar{Z}_I = Z_I \angle \varphi_I$$

и

$$\bar{Z}_{II} = Z_{II} \angle \varphi_{II}$$

суть общие сопротивления двух звеньев, сопрягающихся в узле „2“, то принимается, что:

$$\bar{Z}'_I = Z_I \angle \varphi_{cp(2)}$$

и

$$\bar{Z}'_{II} = Z_{II} \angle \varphi_{cp(2)},$$

где:

$$\varphi_{cp(2)} = \frac{\varphi_I + \varphi_{II}}{2}.$$

Таким же образом получим и для следующих узлов:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_{II} + \varphi_{III} + \varphi_V}{3} &= \varphi_{cp(3)} \\ \dots \dots \dots (13) \\ \frac{\varphi_{III} + \varphi_{IV}}{2} &= \varphi_{cp(4)} \end{aligned}$$

и т. д.

С учетом последнего упрощения, уравнения (12) переписутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{Z_I} - \frac{\bar{E}_2 - \bar{E}_3}{Z_{II}} &= \frac{\bar{W}'_2}{\hat{E}} \angle \varphi_{cp(2)} \\ \frac{\bar{E}_2 - \bar{E}_3}{Z_{II}} - \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_4}{Z_{III}} - \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_5}{Z_V} &= \frac{\bar{W}'_3}{\hat{E}_3} \angle \varphi_{cp(3)} \\ \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_4}{Z_{III}} - \frac{\bar{E}_4 - \bar{E}_5}{Z_{IV}} &= - \frac{\bar{W}'_4}{\hat{E}_4} \angle \varphi_{cp(4)} \\ \dots \dots \dots &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

и т. д.

В таком виде уравнения разрешаются сравнительно легко, т. к. коэффициенты при неизвестных представлены простыми числами.

Как покажут последующие просчеты, ошибка в значениях узловых напряжений, подсчитанных по такому упрощенному методу узловых уравнений, получается сравнительно незначительной.

Покажем приложение упрощенного метода узловых уравнений к расчету конкретной сложной системы, рис. 5³⁾. Все линии двухцепные. Длины звеньев:

$L_I = 150$ км	$L_V = 30$ км
$L_{II} = 150$ "	$L_{VI} = 25$ "
$L_{III} = 35$ "	$L_{VII} = 125$ "
$L_{IV} = 100$ "	

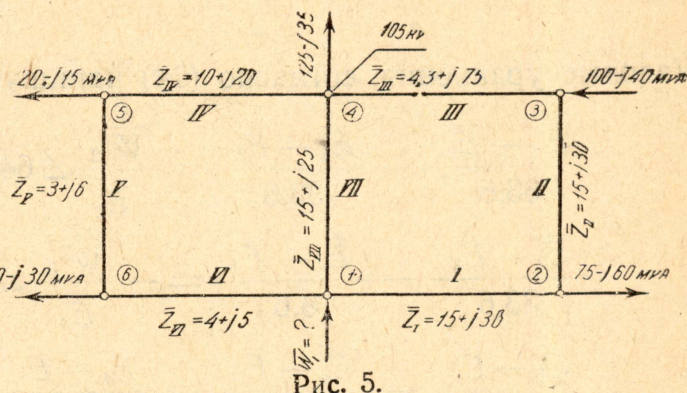


Рис. 5.

Среднее значение емкостной проводимости для всех звеньев принимается равной

$$2,85 \cdot 10^{-6} \text{ } \bar{\sigma} / \text{км} / \text{цепь}$$

Дополнительные реактивные мощности по узлам за счет емкостных токов звеньев, при среднем напряжении 105 кв. получаются:

Для 2-го узла	$j9,45$ mva
" 3-го "	$j5,84$ "
" 4-го "	$j8,2$ "
" 5-го "	$j4,1$ "
" 6-го "	$j1,73$ "

Расчетные мощности по узлам:

во 2-м узле	$75 - j60 + j9,45 =$	$75 - j50,6$ mva
" 3-м "	$-100 + j40 + j5,85 =$	$-100 + j45,84$ "
" 4-м "	$125 - j35 + j8,2 =$	$125 - j26,8$ "
" 5-м "	$20 - j15 + j4,1 =$	$20 - j10,9$ "
" 6-м "	$30 - j30 + j1,73 =$	$30 - j28,27$ "

Средние углы векторов общих сопротивлений по узлам:

$$\text{Для 2-го узла } \frac{\arctg \frac{30}{15} + \arctg \frac{30}{15}}{2} = 64^\circ$$

$$\text{Для 3-го узла } \frac{\arctg \frac{30}{15} + \arctg \frac{7,5}{4,3}}{2} = 62^\circ$$

$$\text{Для 4-го узла } \frac{\arctg \frac{7,5}{4,3} + \arctg \frac{20}{10} + \arctg \frac{25}{15}}{3} = 61^\circ$$

$$\text{Для 5-го узла } \frac{\arctg \frac{20}{10} + \arctg \frac{6}{3}}{2} = 64^\circ$$

³⁾ Условие задачи заимствовано из статьи инж. инж. Баскакова и Соловьева. Эл. станции № 3, 1932 г. стр. 164.

$$\text{Для 6-го узла } \frac{\operatorname{arctg} \frac{6}{3} + \operatorname{arctg} \frac{5}{4}}{2} = 58^\circ$$

Узловые уравнения, согласно (14) напишутся:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{33,6} - \frac{\bar{E}_2 - \bar{E}_3}{33,6} &= \frac{\bar{W}'_2}{\hat{E}_2} \angle 64^\circ = \bar{J}_2 \angle 64^\circ \\ \frac{\bar{E}_2 - \bar{E}_3}{33,6} - \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_4}{8,6} &= -\frac{\bar{W}'_3}{\hat{E}_3} \angle 62^\circ = -\bar{J}_3 \angle 62^\circ \\ \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_4}{8,6} - \frac{\bar{E}_4 - \bar{E}_5}{22,3} - \frac{\bar{E}_4 - \bar{E}_1}{29,2} &= \frac{\bar{W}'_4}{\hat{E}_4} \angle 61^\circ = \bar{J}_4 \angle 61^\circ \\ \frac{\bar{E}_4 - \bar{E}_5}{22,3} - \frac{\bar{E}_5 - \bar{E}_6}{6,6} &= \frac{\bar{W}'_5}{\hat{E}_6} \angle 64^\circ = \bar{J}_5 \angle 64^\circ \\ \frac{\bar{E}_5 - \bar{E}_6}{6,6} - \frac{\bar{E}_6 - \bar{E}_1}{6,4} &= \frac{\bar{W}'_6}{\hat{E}_6} \angle 58^\circ = \bar{J}_6 \angle 58^\circ \end{aligned} \right\}$$

Или, после некоторых преобразований

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_1 - 2\bar{E}_2 + \bar{E}_3 &= 33,6 \bar{J}_2 \angle 64^\circ \\ \bar{E}_2 - 4,91 \bar{E}_3 + 3,9 \bar{E}_4 &= -33,6 \bar{J}_3 \angle 62^\circ \\ \bar{E}_1 + 3,38 \bar{E}_3 - 5,7 \bar{E}_4 + 1,3 \bar{E}_5 &= 29,2 \bar{J}_4 \angle 61^\circ \\ \bar{E}_4 - 4,38 \bar{E}_5 + 3,38 \bar{E}_6 &= 22,3 \bar{J}_5 \angle 64^\circ \\ \bar{E}_5 - 2,03 \bar{E}_6 + 1,03 \bar{E}_1 &= 6,6 \bar{J}_6 \angle 58^\circ \end{aligned} \right\}$$

Имея в виду, что напряжение 4-го узла является заданным и равным 105 кв., получаем, таким образом, систему из пяти уравнений с пятью неизвестными.

Способом последовательного исключения неизвестных ⁴⁾ находим решения узловых уравнений в виде:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= 106,6 + 5,95 \bar{J}_2 \angle 64^\circ - 11,8 \bar{J}_3 \angle 62^\circ + 13,2 \bar{J}_4 \angle 61^\circ + 4,84 \bar{J}_5 \angle 64^\circ + \\ &\quad + 2,38 \bar{J}_6 \angle 58^\circ \text{ кв}; \end{aligned}$$

$$\bar{E}_2 = 46,6 + 0,556 \bar{E}_1 - 18,7 \bar{J}_2 \angle 64^\circ + 3,82 \bar{J}_3 \angle 62^\circ \text{ кв};$$

$$\bar{E}_3 = 93,2 + 0,112 \bar{E}_1 - 3,8 \bar{J}_2 \angle 64^\circ + 7,64 \bar{J}_3 \angle 62^\circ \text{ кв};$$

$$\bar{E}_4 = 105 \text{ кв};$$

$$\bar{E}_5 = 218,3 - 1,06 \bar{E}_1 + 9,88 \bar{J}_2 \angle 64^\circ - 19,86 \bar{J}_3 \angle 62^\circ + 22,4 \bar{J}_4 \angle 61^\circ \text{ кв};$$

$$\bar{E}_6 = 0,296 \cdot (4,38 \bar{E}_5 - 105 + 22,3 \bar{J}_5 \angle 64^\circ) \text{ кв};$$

⁴⁾ Этот способ часто имеет преимущество перед способом через детерминанты, потому что в данном случае обычно приходится иметь дело с системой неполных уравнений.

Далее, последовательным приближением получем значения узловых напряжений.

Результаты подсчетов приведены в таблице 3.

Таблица № 3

Напряжения	I ступень приближения	II ступень приближения	III ступень приближения
$\bar{E}_1 \dots$	$113,8 \angle 4^\circ 06'$	$114,8 \angle 4^\circ 06'$	$114,8 \angle 4^\circ 06'$
$\bar{E}_2 \dots$	$99,55 \angle -48'$	$98,4 \angle -48'$	$98,15 \angle -12'$
$\bar{E}_3 \dots$	$109,45 \angle 2^\circ 06'$	$109,95 \angle 2^\circ 06'$	$109,9 \angle 2^\circ 06'$
$\bar{E}_4 \dots$	$105 \angle 0^\circ$	$105 \angle 0^\circ$	$105 \angle 0^\circ$
$\bar{E}_5 \dots$	$105,6 \angle 2^\circ 24'$	$107,75 \angle 2^\circ 00'$	$107,82 \angle 2^\circ 00'$
$\bar{E}_6 \dots$	$107,8 \angle 2^\circ 54'$	$110,2 \angle 3^\circ 12'$	$110,4 \angle 3^\circ 00'$

Обращается внимание на совершенно незначительную разницу в значениях напряжений 2-й и 3-й ступеней приближения.

Найдем также и распределение нагрузок по звеньям ⁵⁾:

$$\begin{aligned} \text{Звено 1-е: а) } \bar{W}_{I(\kappa)} &= \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{Z_1} \cdot \hat{E}_1 = \\ &= \frac{114,8 \angle 4^\circ 06' - 98,15 \angle -12'}{33,6 \angle 64^\circ} \cdot 114,8 \angle -4^\circ 06' = \underline{48 - j40,0} \text{ мва} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{в) } \bar{W}_{I(\kappa)} &= \frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{Z_1} \cdot \hat{E}_2 = \\ &= \frac{114,8 \angle 4^\circ 06' - 98,15 \angle -12'}{33,6 \angle 64^\circ} \cdot 98,15 \angle -12' = \underline{43,5 - 32,0} \text{ мва} \end{aligned}$$

$$\text{Звено 2-е: а) } \bar{W}_{II(\kappa)} = \dots = \underline{-(28,0 - j23,0)} \text{ мва}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{II(\kappa)} = \dots = \underline{-(30 - j25,0)} \text{ „}$$

$$\text{Звено 3-е: а) } \bar{W}_{III(\kappa)} = \dots = \underline{74 - j30} \text{ мва}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{III(\kappa)} = \dots = \underline{71 - j25} \text{ „}$$

$$\text{Звено 4-е: а) } \bar{W}_{IV(\kappa)} = \dots = \underline{-(19,0 + j1)} \text{ мва}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{IV(\kappa)} = \dots = \underline{-(22,0 - j2)} \text{ „}$$

$$\text{Звено 5-е: а) } \bar{W}_{V(\kappa)} = \dots = \underline{-(45 - j11)} \text{ „}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{V(\kappa)} = \dots = \underline{-(48 - j14)} \text{ „}$$

$$\text{Звено 6-е: а) } \bar{W}_{VI(\kappa)} = \dots = \underline{-(75 - j38)} \text{ „}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{VI(\kappa)} = \dots = \underline{-(78 - j40)} \text{ „}$$

$$\text{Звено 7-е: а) } \bar{W}_{VII(\kappa)} = \dots = \underline{-(45,0 - j18,0)} \text{ „}$$

$$\text{в) } \bar{W}_{VII(\kappa)} = \dots = \underline{-(42,0 - j16,0)} \text{ „}$$

Электрическое состояние рассчитанной системы представлено на рис. 6.

⁵⁾ Эти, как и многие другие, подсчеты здесь произведены на 25-ти см. логарифм. линейке.

Результаты расчета (рис. 6) показывают, что небаланс мощностей в узлах в этом случае может быть значительным. Правда, здесь не все можно отнести за счет упрощения метода узловых уравнений, здесь часть ошибки получается за счет счетной линейки. Тем не менее, для того, чтобы иметь уверенность в том, что узловые напряжения по упрощенному методу узловых уравнений получаются без значительной ошибки, просчитаем этим же методом пример рисунка 2-го, глава III. Этот пример ранее рассчитан

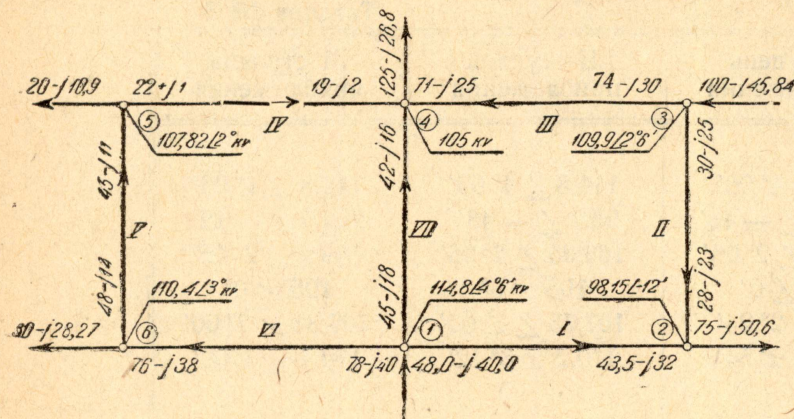


Рис. 6.

точным методом узловых уравнений, и потому результаты расчетов в обоих случаях сравнить.

Эти результаты приводятся в таблице 4.

Таблица № 4.

Методы расчета	Узловые напряжения			
	E_1	E_2	E_3	E_4
Точный метод узловых уравнений	113,63	105	121,5	99,4
Упрощенный метод узловых напряжений	114,2	105	121,85	100

Как видим, отклонение от истинных значений узловых напряжений, даже в этом примере, где звенья длиной 200 км и выше, получилось незначительное.

V.

Метод преобразований или трансформации в том виде, как он применяется к расчету низковольтных сетей, имеет в основе своей несколько положений, предложенных Фриком и Кенелли, позволяющих преобразовать сеть из сложной в простую, для этой последней найти распределение, пока еще фиктивное, и затем идя обратно, т. е. ретрансформируя сеть, находим действительное токораспределение в звеньях сети и следовательно напряжения в узлах.

Положение 1-е⁶⁾. Между точками A и B рис. 7, два провода с сопротивлениями R_I и R_{II} можно заменить одним с сопротивлением R так, что при протекании от точки A до точки B одного и того же тока падение напряжения между этими точками в обоих случаях будет одинаково.

Этому положению удовлетворяет соотношение—

$$R = \frac{R_I \cdot R_{II}}{R_I + R_{II}} \Omega$$

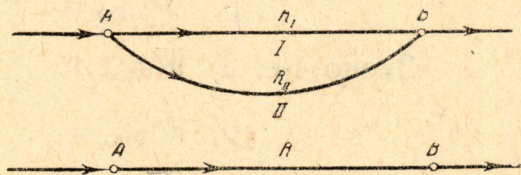


Рис. 7.

⁶⁾ Проф. А. А. Глазунов „Теория и расчет распредел. сетей“.

Положение 2-е. Токую нагрузку (рис. 8) в точке „С“ можно разнести в две другие точки „а“ и „b“ так что токи, а, следовательно, и падения напряжения на участках Ав и Вb останутся без изменения. Части тока J_c в точках „а“ и „b“ вычисляются из соотношений:

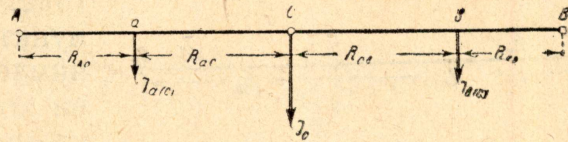


Рис. 8.

$$J_{a(c)} = J_c \frac{R_{Cb}}{R_{aC} + R_{Cb}},$$

$$J_{b(c)} = J_c \frac{R_{Ca}}{R_{aC} + R_{Cb}},$$

При чем

$$J_{a(c)} + J_{b(c)} = J_c.$$

Положение 3-е. Можно ток J , протекающий по проводу с сопротивлением R (рис. 9), представить в виде суммы двух токов J_I и J_{II} , протекающих по двум проводам, с сопротивлением R_I и R_{II} , так, что падение напряжения между точками А и В останется без изменения.

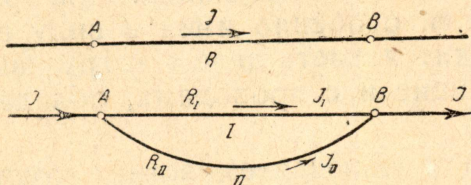


Рис. 9.

Токи J_I и J_{II} вычисляются по формулам:

$$J_I = J \frac{R}{R_I};$$

$$J_{II} = J \frac{R}{R_{II}}.$$

Положение 4-е. Часть сети, имеющую форму треугольника (рис. 10), можно заменить эквивалентной звездой, причем сопротивления лучей звезды подсчитывают по формулам:

$$r_I = \frac{R_I \cdot R_{III}}{R_I + R_{II} + R_{III}};$$

$$r_{II} = \frac{R_I \cdot R_{II}}{R_I + R_{II} + R_{III}};$$

$$r_{III} = \frac{R_{II} \cdot R_{III}}{R_I + R_{II} + R_{III}}.$$

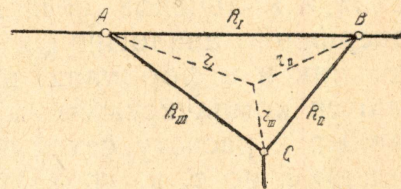


Рис. 10.

При обратном преобразовании звезды в треугольник проводимость сторон эквивалентного треугольника определяется так:

$$y_I = \frac{\lambda_I \cdot \lambda_{II}}{\lambda_I + \lambda_{II} + \lambda_{III}};$$

$$y_{II} = \frac{\lambda_{II} \cdot \lambda_{III}}{\lambda_I + \lambda_{II} + \lambda_{III}};$$

$$\lambda_{III} = \frac{\lambda_I \cdot \lambda_{III}}{\lambda_I + \lambda_{II} + \lambda_{III}}.$$

Помощью указанных 4 положений сложная сеть может быть приведена к линии, питаемой с двух сторон (рис. 11) или к случаю кольцевой сети (рис. 12). Если напряжения питательных пунктов А и В одинаковы, как это принимается в большинстве случаев расчетов низковольтных сетей, то оба эти случая идентичны, и токи, вытекающие из питательных пунктов, напр., рис. 12 (кольцо)

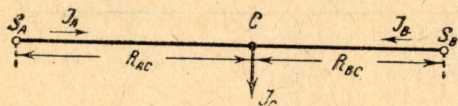


Рис. 11.

можно определить, как

$$J_1 = J_c \frac{R_{II}}{R_I + R_{II}},$$

$$J_{II} = J_c \frac{R_I}{R_I + R_{II}}.$$

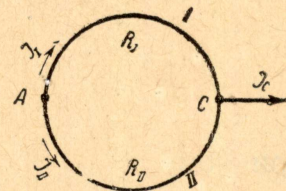


Рис. 12.

Все приведенные положения, на основании которых можно трансформировать и затем рассчитать сложную сеть, относятся к случаю постоянного тока или к случаю переменного тока, когда речь идет о безиндукционной нагрузке и когда сеть не обладает емкостью и самоиндукцией. При расчете сети переменного тока в общем случае, и особенно имея в виду высоковольтную сеть переменного тока, приходится иметь дело с нагрузками, включающими в себя реактивные составляющие и с проводами, обладающими емкостью и самоиндукцией.

Принимая П-образную схему замещения и включая емкостные токи в нагрузки узлов, можно при расчете сетей иметь в виду лишь случай протекания токов, обладающих реактивными составляющими, по проводам, обладающим индуктивностью. Может ли в этом случае сложная сеть быть преобразованной в простую на основании приведенных выше положений? Да, может быть. Положения 1, 3 и 4 применительно к переменному току и проводам, обладающим омическим и индуктивным сопротивлениями, доказываются в теоретической электротехнике ¹⁾. Точно также в руководствах по расчету сетей доказывается ²⁾ возможность определения токораспределения в кольцевой сети и линии, питаемой с двух сторон, по формулам, совершенно аналогичным случаю постоянного тока и лишь в этих формулах, как и в формулах положений 1, 2 и 4, сопротивления и токи выражаются комплексными числами. Положение же 2-е также полностью применимо к расчету сетей переменного тока на основе П-образной схемы замещения, но т. к. доказательства этого положения, применительно к разбираемому случаю обычно не приводят, докажем это положение применительно к сети переменного тока со всеми вытекающими отсюда особенностями.

На рис. 13 изображена линия, питаемая с двух сторон, имеющая нагрузку в т. С. Требуется разнести ток J_c в точки „а“ и „б“ так, чтобы ток и падение напряжения на участках Аа и Вб при этом не изменились. При этом в этом случае ток и со-

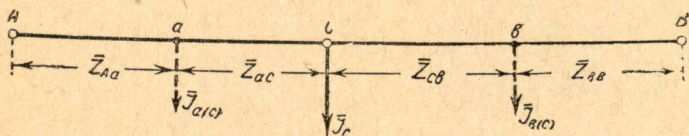


Рис. 13.

противления участков линии суть комплексные числа.

¹⁾ Круг, К. А. „Основы электротехники“.

²⁾ Проф. А. А. Глазун. „Теория и расчет распр. сетей“.

По аналогии с решением подобной задачи для случая постоянного тока положим, что:

$$\bar{J}_{a(c)} = \frac{\bar{Z}_{Cb}}{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb}} \cdot \bar{J}_C,$$

$$\bar{J}_{b(c)} = \frac{\bar{Z}_{aC}}{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{bC}} \cdot \bar{J}_C.$$

Тогда на участке Аа после преобразования сети будет протекать ток

$$\begin{aligned} \bar{J}_{A'} &= \frac{\bar{J}_{(C)a}(\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}) + \bar{J}_{b(C)} \cdot \bar{Z}_{bB}}{\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}} = \\ &= \frac{\bar{J}_C \frac{\bar{Z}_{Cb}}{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb}} \cdot (\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}) + \bar{J}_C \frac{\bar{Z}_{aC}}{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb}} \cdot \bar{Z}_{bB}}{\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}} = \\ &= \frac{\bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} \cdot \bar{Z}_{aC} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} \cdot \bar{Z}_{Cb} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} \cdot \bar{Z}_{bB} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{aC} \cdot \bar{Z}_{bB}}{(\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb})(\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB})}. \end{aligned}$$

До преобразования на участке Аа протекал ток

$$\bar{J}_A = \frac{\bar{J}_C \cdot (\bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{CB})}{\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}},$$

или после умножения числителя и знаменателя на $(\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb})$ —

$$\begin{aligned} \bar{J}_A &= \frac{\bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{bB}}{\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB}} \cdot \frac{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb}}{\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb}} = \\ &= \frac{\bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} \cdot \bar{Z}_{aC} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{Cb} \cdot \bar{Z}_{Cb} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{bB} \cdot \bar{Z}_{aC} + \bar{J}_C \cdot \bar{Z}_{bB} \cdot \bar{Z}_{Cb}}{(\bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb})(\bar{Z}_{Aa} + \bar{Z}_{aC} + \bar{Z}_{Cb} + \bar{Z}_{bB})}, \end{aligned}$$

т. е.

$$\bar{J}_{A'} = \bar{J}_A.$$

Применим метод трансформации к определению напряжений и потоко-распределения мощностей в системе (рис. 5), в которой выше уже были найдены напряжения в узлах и мощности в звеньях по методу узловых уравнений. Для выражения нагрузок в узлах в токах примем в качестве среднего напряжения 110 кВ.

Тогда узловые нагрузки в токах, с учетом емкостных токов звеньев, будут:

$$\text{Во 2-м узле } \frac{75 - j50,6}{110} = 0,682 - j0,460 \text{ KA}$$

$$\text{В 3-м " } \frac{100 - j45,84}{110} = 0,910 - j0,417 \text{ KA}$$

$$\text{" 4-м " } \frac{125 - j26,8}{110} = 1,135 - j0,244 \text{ KA}$$

$$\text{" 5-м " } \frac{20 - j10,9}{110} = 0,182 - j0,0992 \text{ KA}$$

$$\text{" 6-м " } \frac{30 - j28,27}{110} = 0,273 - j0,257 \text{ KA}$$

Полученные токовые нагрузки, с погрешностью за счет принятия во всех узлах среднего напряжения, а также и сопротивления звеньев сети, нанесены на рис. 14.

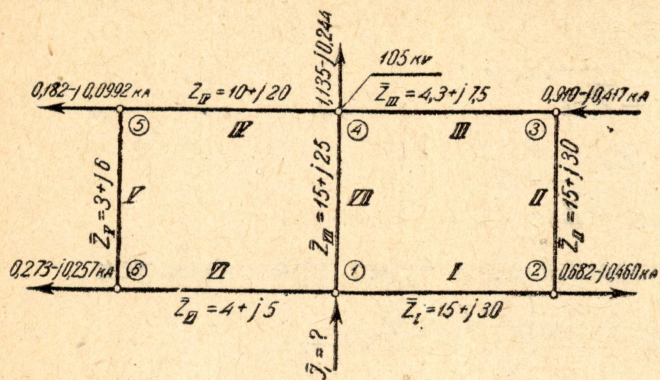


Рис. 14.

Прежде всего, согласно положения 2-го метода трансформации, разнесем нагрузки 2-го и 3-го узлов в узлы „1“ и „4“. Величина дополнительных фиктивных нагрузок в узлах „1“ и „4“ определится, как:

$$\bar{J}_{1(2,3)} = \frac{\bar{J}_2(\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}) - \bar{J}_3 \cdot \bar{Z}_{III}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}$$

$$\bar{J}_{4(2,3)} = \frac{\bar{J}_2(\bar{Z}_I) - \bar{J}_3 \cdot (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II})}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} = \bar{J}_2 + (-\bar{J}_3) - \bar{J}_{1(2,3)}.$$

Если выражение для определения $\bar{J}_{1(2,3)}$ преобразовать *), то можно с большим удобством находить отдельно активную и реактивную составляющие тока $\bar{J}_{1(2,3)}$ из выражений:

$$J_{1(2,3)a} = G_0 \Sigma (J_{a(n)} \cdot R_n^1 + J_{r(n)} \cdot X_n^1) + B_0 \Sigma (J_{a(n)} \cdot X_n^1 + J_{r(n)} \cdot R_n^1);$$

$$J_{1(2,3)r} = -G_0 \Sigma (J_{a(n)} \cdot X_n^1 - J_{r(n)} \cdot R_n^1) + B_0 \Sigma (J_{a(n)} \cdot R_n^1 + J_{r(n)} \cdot X_n^1).$$

Здесь: G_0 и B_0 — активная и реактивная проводимости части контура между точками, в которые разносят нагрузки; произведения $J_{a(n)} \cdot R_n^1$, $J_{r(n)} \cdot X_n^1$ и т. д. есть произведения активных и реактивных составляющих нагрузок, подлежащих разнесению, на соответствующее омическое или индуктивное сопротивление до противоположной точки (т. е. в данном случае до т. „4“).

$$G_0 = \frac{R_I + R_{II} + R_{III}}{(R_I + R_{II} + R_{III})^2 + (X_I + X_{II} + X_{III})^2} =$$

$$= \frac{15 + 15 + 4,3}{(15 + 15 + 4,3)^2 + (30 + 30 + 7,5)^2} = 0,00598 \text{ в};$$

$$B_0 = \frac{X_I + X_{II} + X_{III}}{(R_I + R_{II} + R_{III})^2 + (X_I + X_{II} + X_{III})^2} =$$

$$= \frac{30 + 30 + 7,5}{(15 + 15 + 4,3)^2 + (30 + 30 + 7,5)^2} = 0,01175 \text{ в};$$

$$\Sigma (J_{a(n)} \cdot R_n^1 + J_{r(n)} \cdot X_n^1) = (0,682 \cdot 19,3 - 0,910 \cdot 4,3 + 0,460 \cdot 37,5 - 0,417 \cdot 7,5) =$$

$$= 23,37;$$

$$\Sigma (J_{a(n)} \cdot X_n^1 - J_{r(n)} \cdot R_n^1) = (0,682 \cdot 37,5 - 0,910 \cdot 7,5 + 0,460 \cdot 19,3 - 0,417 \cdot 4,3) =$$

$$= 11,99.$$

Следовательно:

$$J_{1(2,3)a} = 0,00598 \cdot 23,37 + 0,01175 \cdot 11,69 = 0,277 \text{ KA}$$

$$J_{1(2,3)r} = -0,00598 \cdot 11,69 + 0,01175 \cdot 23,37 = 0,204 \text{ KA}$$

*) См. напр. проф. А. А. Глазунов „Теория и расчет эл. распредел. сетей“.

Часть тока, отнесенная к 4-му узлу, теперь получится как—

$$J_{4(2,3)} = 0,862 - j0,460 - 0,910 + j0,417 - 0,277 + j0,204 = \\ = -(0,505 - j0,161) \text{ KA.}$$

Знак минус перед током $J_{4(2,3)}$ указывает на то, что этот ток притекает к 4-му узлу.

В преобразованном виде сеть представлена на рис. 15.
Сумма нагрузок в 4-м узле—

$$J_4 = 1,135 - j0,244 + [-(0,505 - j0,161)] = \\ = 0,630 - j0,083 \text{ KA}$$

Эквивалентное сопротивление звеньев VII и I, II, III

$$\bar{Z}_9 = \frac{\bar{Z}_{VII} \cdot (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})}{\bar{Z}_{VII} + (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})} = \\ = \frac{15 + j25 \cdot (15 + j30 + 15 + j30 + 4,3 + j7,5)}{15 + j25 + 15 + j30 + 15 + j30 + 4,3 + j7,5} = 10,45 + j18,35 \text{ } \Omega$$

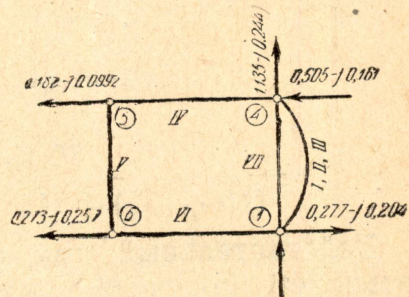


Рис. 15.

Теперь сеть представляет собою кольцо с питанием в т. „1“. Токораспределение в этом кольце найдем по формуле, только что использованной для разнесения нагрузки 2-го и 3-го узлов.

$$G'_0 = \frac{R_9 + R_{IV} + R_V + R_{VI}}{(R_9 + R_{IV} + R_V + R_{VI})^2 + (X_9 + X_{IV} + X_V + X_{VI})^2} = \\ = \frac{10,45 + 10 + 3 + 4}{(10,45 + 10 + 3 + 4)^2 + (18,35 + 20 + 6 + 5)^2} = 0,00862 \text{ } \sigma$$

$$B'_0 = \frac{X_9 + X_{IV} + X_V + X_{VI}}{(R_9 + R_{IV} + R_V + R_{VI})^2 + (X_9 + X_{IV} + X_V + X_{VI})^2} = \\ = \frac{18,35 + 20 + 6 + 5}{(10,45 + 10 + 3 + 4)^2 + (18,35 + 20 + 6 + 5)^2} = 0,01545 \text{ } \sigma$$

Вычисление суммы и разности произведений активных и реактивных составляющих токов узловых нагрузок (4-го, 5-го и 6-го) на соответствующие омическое и индуктивное сопротивления помещаем в таблице 5.

Таблица № 5.

Узел	$J_{a(n)}$	$J_{r(n)}$	R'_n	X'_n	$J_{a(n)} \cdot R'_n$	$J_{a(n)} \cdot X'_n$	$J_{r(n)} \cdot R'_n$	$J_{r(n)} \cdot X'_n$
4	0,630	0,083	17	31	11,05	20,15	1,410	2,570
5	0,182	0,0992	7	11	1,27	2,00	0,694	1,090
6	0,273	0,257	4	5	1,09	1,363	1,027	1,283
Σ	1,085	0,4392	27,45	49,35	13,41	23,513	3,131	4,943

Следовательно

$$\Sigma (J_{a(n)} \cdot R'_n + J_{r(n)} \cdot X'_n) = 13,41 + 4,943 = 18,353 ;$$

$$\Sigma (J_{a(n)} \cdot X'_n - J_{r(n)} \cdot R'_n) = 23,513 - 3,131 = 20,382$$

и

$$\underline{J_{1(4,5,6) \alpha}} = 0,00862 \cdot 18,353 + 0,01545 \cdot 20,382 = \underline{0,474 \text{ KA}};$$

$$\underline{J_{1(4,5,6) r}} = 0,00862 \cdot 20,382 + 0,01545 \cdot 18,353 = \underline{0,109 \text{ KA}};$$

т. е.

$$\bar{J}_{1(4,5,6)} = 0,474 - j0,109 \text{ KA},$$

Часть тока $\bar{J}_{1(4,5,6)}$, протекающая по звену 1-му, может быть найдена согласно положения 3-го метода трансформации

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_{1(4,5,6)} \cdot \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} = (0,474 - j0,109) \cdot$$

$$\frac{10,45 + j18,35}{(15 + j30) + (15 + j30) + (4,3 + j7,5)} = \underline{0,130 - j0,0367 \text{ KA}}$$

Действительный ток, протекающий по звену 1-му, получится, если к только что подсчитанному току прибавить нагрузку первого узла, получившуюся за счет разнесения токов узлов „2“ и „3“.

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_1 - \bar{J}_{1(2,3)} = 0,130 - j0,0367 + 0,277 - j0,204 = \underline{0,407 - j0,241 \text{ KA}}$$

Нагрузки всех других звеньев найдем по закону Кирхгофа, отнимая (алгебраически) от токов предыдущих звеньев нагрузки соответствующих узлов.

$$\bar{J}_{II} = \bar{J}_1 - \bar{J}_2 = 0,407 - j0,241 - (0,682 - j0,460) = \underline{-(0,275 - j0,219) \text{ KA}}$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_{III} &= \bar{J}_{II} - \bar{J}_3 = -(0,275 - j0,219) - [-(0,910 - j0,417)] = \\ &= \underline{0,635 - j0,198 \text{ KA}} \end{aligned}$$

$$\bar{J}_{VII} = \bar{J}_{I(4,5,6)} - \bar{J}_1 = 0,474 - j0,109 - (0,13 - j0,367) = \underline{0,344 - j0,072 \text{ KA}}$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_{IV} &= \bar{J}_{VII} + \bar{J}_{III} - \bar{J}_4 = 0,344 - j0,072 + 0,635 - j0,198 - (1,135 - j0,244) = \\ &= \underline{-(0,156 + j0,026) \text{ KA}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_V &= \bar{J}_{IV} - \bar{J}_5 = -(0,156 + j0,026) - (0,182 - j0,0992) = \\ &= \underline{-(0,338 - j0,073) \text{ KA}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_{VI} &= \bar{J}_V - \bar{J}_6 = -(0,338 - j0,073) - (0,273 - j0,267) = \\ &= \underline{-(0,611 - j0,330) \text{ KA}}. \end{aligned}$$

Ток в VI звене проверим из соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{J}_{VI} &= (\bar{J}'_4 + \bar{J}_5 + \bar{J}_6) - \bar{J}_{1(4,5,6)} = (0,630 - j0,083 + 0,182 - j0,0992 + \\ &+ 0,273 - j0,257) - (0,474 - j0,109) = \underline{0,611 - j0,330 \text{ KA}}. \end{aligned}$$

Токораспределение в сети, найденное по методу трансформации, нанесено на рис. 16, причем от станции узла „1“ отбирается ток

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_I + \bar{J}_{VII} + \bar{J}_{VI} + \frac{1}{2}(\bar{J}_{cI} + \bar{J}_{cVII} + \bar{J}_{cVI}) = 0,407 - j0,241 +$$

$$+ 0,344 - j0,072 + 0,611 - j0,330 + jJ_{I(c)} = 1,362 - j0,643 + jJ_{I(c)} \quad *)$$

*) $jJ_{I(c)}$ — ток в первом узле за счет емкости звеньев I, VII и VI.

Теперь нетрудно найти напряжения в узлах, при условии, что

$$\bar{E}_4 = E_4 = 105 \text{ kv}$$

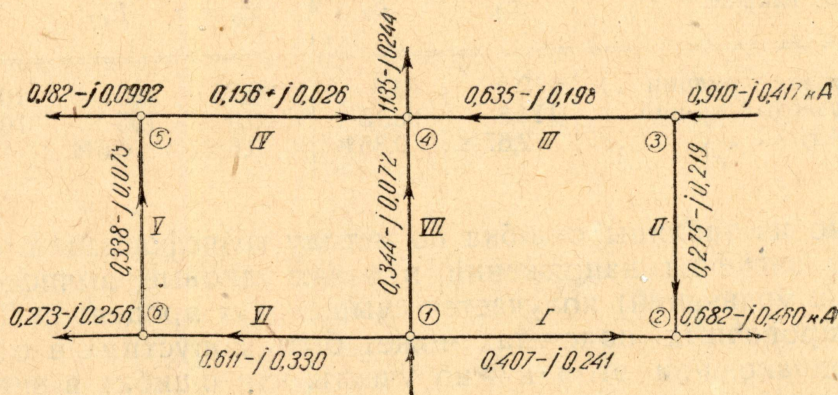


Рис. 16.

$$\bar{E}_3 = \bar{E}_4 + \bar{J}_{III} \cdot \bar{Z}_{III} = 105 + (0,635 - j0,198) \cdot (4,3 + j7,5) = 109,20 + j3,93;$$

и

$$E_3 = \sqrt{109,20^2 + 3,93^2} = 109,25 \text{ kv.}$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_3 - \bar{J}_{II} \cdot \bar{Z}_{II} = 109,20 + j3,93 - (0,276 - j0,219) \cdot (15 + j30) = 98,49 - j1,06;$$

и

$$E_2 = \sqrt{98,49^2 + 1,06^2} = 98,50 \text{ kv.}$$

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_2 + \bar{J}_I \cdot \bar{Z}_I = 98,49 + j1,06 + (0,407 - j0,241) \cdot (15 + j30) = 111,81 + j7,37;$$

и

$$E_1 = \sqrt{111,81^2 + 7,37^2} = 112,06 \text{ kv.}$$

$$\bar{E}_5 = \bar{E}_4 + \bar{J}_{IV} \cdot \bar{Z}_{IV} = 105 + (0,156 + j0,026) \cdot (10 + j20) = 106,05 + j3,40;$$

и

$$E_5 = \sqrt{106,05^2 + 3,40^2} = 106,1 \text{ kv.}$$

$$\bar{E}_6 = \bar{E}_5 + \bar{J}_V \cdot \bar{Z}_V = 106,05 + j3,40 + (0,338 - j0,073) \cdot (3 + j6) = 107,51 + j5,21;$$

и

$$E_6 = \sqrt{107,51^2 + 5,21^2} = 107,63 \text{ kv.}$$

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_6 + \bar{J}_{VI} \cdot \bar{Z}_{VI} = 107,51 + j5,21 + (0,611 - j0,330) \cdot (4 + j5) = 111,6 + j7,0;$$

и

$$E_1 = \sqrt{111,6^2 + 7,0^2} = 111,85 \text{ kv.}$$

Некоторые расхождение в значениях E_1 вычисленных по I звену и VI, объясняется неточностью вычислений на счетной линейке.

Найденные значения напряжений нанесены на схему сети, рис. 17.

Значения напряжений, найденные методом трансформации, когда нагрузки в узлах учтены в токах через среднее узловое напряже-

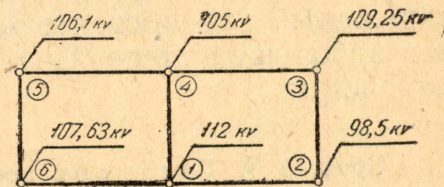


Рис. 17.

ние в 110 *kv*, для сравнения с таковыми же значениями, определенными по методу узловых уравнений, выписаны в таблицу 6.

Таблица 6.

Узлов. напряж.	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
По методу трансформации . .	112,0	98,5	109,25	105	106,1	107,63
По методу узловых уравнений . .	114,8	98,15	109,9	105	107,82	110,4
Разница в % %	2,67 %	0,35 %	0,6 %	0,0 %	1,6 %	2,5 %

Как видно из таблицы, ошибка по методу трансформации (если принять за истинные значения напряжений в узлах таковые, вычисленные по методу узловых уравнений) получается свыше двух процентов. Такая ошибка при ориентировочных подсчетах может быть допустима в отношении напряжений, однако, при этом нужно учесть, что ошибка в значениях узловых напряжений в 2% связана с гораздо большей ошибкой в части токораспределения в звеньях. Так, например, по звену IV (в конце его, если идти против часовой стрелки) имеем значения потоков мощностей:

а) по методу трансформации . . . $16,7 + j2,23 \text{ mva}$

в) по " узловых уравнений . . $22,6 + j8$

Разница в части активных мощностей . . . 26% и

в части реактивных мощностей . . . 70%.

Кроме всего этого, нужно еще учесть, что все эти неточности еще зависят от удачности выбора среднего напряжения, по которому определяются расчетные токовые нагрузки.

Очевидно, необходимо сделать вывод, что рекомендовать для широкого применения и для окончательных подсчетов метод трансформации в таком виде нельзя.

Строго говоря, сам процесс трансформации сети не вносит ошибки в результаты расчета сети. Ошибка была сразу же заложена в основных расчетных данных—в нагрузках. Токовые нагрузки по узлам были приняты несоответствующими действительности, ибо заданные по узлам мощности были отнесены к одному и тому же „среднему“ напряжению в 110 *kv*. В результате расчета в некоторых узлах получены напряжения, совершенно отличные от этого „среднего“ напряжения. Так напр., в узле 2 получилось напряжение 98,5 *kv*, и т. о., в основу расчета нужно было бы положить ток

$$\bar{J}_2^1 = \frac{75 - j50,6}{98,5} = 0,762 - j0,514,$$

вместо

$$\bar{J}_2 = 0,682 - j0,460 \text{ KA}.$$

Кроме того, нужно было бы еще учесть фазовую различность векторов напряжений во всех узлах.

Но оказывается, как это показано в последнее время проф. А. А. Глазуновым, проф. А. Я. Рябовым и доц. Ф. П. Лашковым¹⁾ можно трансформировать сети с нагрузками в узлах, выраженными в мощностях, и т. о., в процессе расчета сети нет нужды знать предварительно узловые напряжения. Это обстоятельство является чрезвычайно важным, т. к. позволяет в большой степени расширить возможности в области расчетов сложных систем.

¹⁾ Проф. А. А. Глазунов, проф. А. Я. Рябов и доц. Ф. П. Лашков. „Расчет электрических сетей энерг. систем“.

Приведем здесь доказательства основных положений, позволяющих использовать метод трансформации в этом новом его качестве.

Положение 1-е. Между точками А и В (рис. 18) сети протекают по двум параллельным линиям с сопротивлениями $\bar{Z}_I$ и $\bar{Z}_{II}$ мощности $\bar{W}_I$ и $\bar{W}_{II}$. Требуется найти значение сопротивления одиночной линии, по которой между точками А и В протекала бы мощность, равная сумме $\bar{W}_I$ и $\bar{W}_{II}$, и при этом падение напряжения между точками А и В осталось бы без изменения.

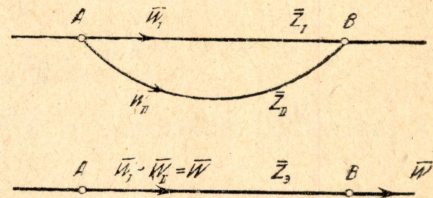


Рис. 18.

Так как равенство —

$$\frac{\bar{W}_I}{\hat{E}_B} + \frac{\bar{W}_{II}}{\hat{E}_B} = \frac{\bar{W}}{\hat{E}_B}$$

равнозначно равенству —

$$\bar{J}_I + \bar{J}_{II} = \bar{J},$$

то очевидно

$$\bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}}.$$

На том же основании для процесса обратной трансформации можно написать:

$$\bar{W}_I = \bar{W} \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_I},$$

$$\bar{W}_{II} = \bar{W} \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_{II}}.$$

Положение 2-е. Имеется кольцевая сеть (рис. 19) с одиночной нагрузкой в т. „b“ и питательным пунктом в т. „А“. Определим потокораспределение в этой сети.

Можно написать:

$$\frac{\bar{W}_{I(b)}}{\hat{E}_b} \cdot \bar{Z} = \frac{\bar{W}_{II(b)}}{\hat{E}_b} \cdot \bar{Z}_{II},$$

где $\bar{W}_{I(b)}$ и $\bar{W}_{II(b)}$ предполагаемые потоки мощностей по ветвям I и II около т. „b“ и следовательно:

$$\frac{\bar{W}_{I(b)}}{\bar{W}_{II(b)}} = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I}.$$

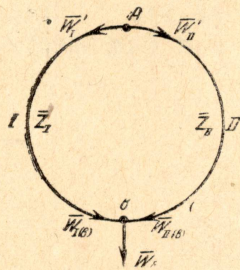


Рис. 19.

Но так как

то

$$\bar{W}_{I(b)} + \bar{W}_{II(b)} = \bar{W}_b,$$

и

$$\bar{W}_I = \bar{W}_b \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}}$$

$$\bar{W}_{II} = \bar{W}_b \frac{\bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}}.$$

Т. е. формулы имеют вид, подобный случаю, когда нагрузка кольца задана в амперах.

$$\begin{aligned} & \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_{III} - \left(\frac{W'_{III}}{E_A} \right)^2 \cdot \bar{Z}_{III}^2 + \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_{II} - \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_{II} - \Delta \bar{W}_{III} \cdot \bar{Z}_{II} - \bar{W}_b \cdot \bar{Z} - \\ & - \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_I \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_{II} \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_{III} \cdot \bar{Z}_I + \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_I + \end{aligned}$$

Однако, выведенные формулы не дают представления о том, какие потоки мощностей отходят от т. „А“. Эти мощности должны покрывать нагрузку в т. „b“ и, кроме того, потери в кольце, т. е.

$$\bar{W}'_I = \bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{I(b)}$$

и

$$\bar{W}'_{II} = \bar{W}_{II(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)}.$$

Для определения $\bar{W}'$ и $\bar{W}'_{II}$ напомним соотношение:

$$\frac{\bar{W}'_I}{\bar{E}_A} \cdot \bar{Z}_I = \frac{\bar{W}'_{II}}{\bar{E}_A} \cdot \bar{Z}_{II},$$

или:

$$\frac{\bar{W}'_I}{\bar{W}'_{II}} = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I};$$

Но так как:

$$\begin{aligned} \bar{W}_A &= \bar{W}'_I + \bar{W}'_{II} = \bar{W}_{I(b)} + \bar{W}_{II(b)} + \Delta \bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)} = \\ &= \bar{W}_{(b)} + (\Delta \bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)}), \end{aligned}$$

то:

$$\bar{W}'_I = \bar{W}_A \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}} = \bar{W}_{(b)} \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}} + (\Delta \bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)}) \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}}$$

и

$$\bar{W}'_{II} = \bar{W}_A \frac{\bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}} = \bar{W}_{(b)} \frac{\bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}} + (\Delta \bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)}) \frac{\bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}}.$$

Выведенные формулы указывают на очень важное обстоятельство, что потери в кольцевой сети распределяются по тому же самому закону, что и основной поток мощности.

А так как из сопоставления соотношений:

$$\frac{\bar{W}_{I(b)}}{\bar{W}_{II(b)}} = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I}$$

и

$$\frac{\bar{W}'_I}{\bar{W}'_{II}} = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I} = \frac{\bar{W}_{I(b)} + \Delta \bar{W}_{I(b)}}{\bar{W}_{II(b)} + \Delta \bar{W}_{II(b)}}$$

следует, что и

$$\frac{\Delta \bar{W}_{I(b)}}{\Delta \bar{W}_{II(b)}} = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_I},$$

или

$$\frac{\Delta \bar{W}_{I(b)}}{\Delta \bar{W}_{II(b)}} = \frac{\bar{W}_{I(b)}}{\bar{W}_{II(b)}},$$

то и подсчет и разнесение по кольцу потерь значительно упрощаются, т. к.—оказывается—потери пропорциональны потокам мощностей в кольце, найденным без учета потерь.

Посмотрим, в какой мере выведенное здесь правило определения потоко-распределения мощностей в кольцевой сети на примере одиночной нагрузки применимо к случаю нескольких нагрузок.

Дана кольцевая сеть (рис. 20) с двумя точками отбора мощности. Предполагая, что в т. „в“ имеет место потокораздел мощностей, а также имея в виду обозначения рис. 20, можно написать:

$$\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_{III} + \frac{\bar{W}'_{II}}{\hat{E}_C} \cdot \bar{Z}_{II} - \frac{\bar{W}'_I}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_I = 0$$

Но так как

$$\bar{W}'_{II} = \bar{W}'_{III} - \bar{W}_c - \Delta \bar{W}_{III}$$

и

$$\bar{W}'_I = \bar{W}_b + \bar{W}_c + \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} - \bar{W}'_{III},$$

где $\Delta \bar{W}_I$, $\Delta \bar{W}_{II}$ и $\Delta \bar{W}_{III}$ — потери на соответствующих участках сети, то уравнение баланса напряжений в кольце переписывается так:

$$\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_{III} + \frac{\bar{W}'_{III} - \bar{W}_c - \Delta \bar{W}_{III}}{\hat{E}_C} \cdot \bar{Z}_{II} - \frac{\bar{W}_b + \bar{W}_c + \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} - \bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_I = 0.$$

Далее, имея в виду, что

$$\bar{E}_c = \bar{E}_A - \frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_{III},$$

перепишем основное соотношение в виде:

$$\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_{III} + \frac{\bar{W}'_{III} - \bar{W}_c - \Delta \bar{W}_{III}}{\hat{E}_A - \frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_{III}} \cdot \bar{Z}_{II} - \frac{\bar{W}_b + \bar{W}_c + \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} - \bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \cdot \bar{Z}_I = 0$$

или

$$\begin{aligned} & \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_{III} - \left(\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A} \right)^2 \cdot \bar{Z}_{III}^2 + \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_{II} - \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_{II} - \Delta \bar{W}_{III} \cdot \bar{Z}_{II} - \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_I - \\ & - \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_I \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_{II} \cdot \bar{Z}_I - \Delta \bar{W}_{III} \cdot \bar{Z}_I + \bar{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_I + \\ & + \frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A^2} (\bar{W}_b + \bar{W}_c + \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} - \bar{W}'_{III}) \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III} = 0. \end{aligned}$$

В этом уравнении член

$$\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A^2} (\bar{W}_b + \bar{W}_c + \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} - \bar{W}'_{III}) \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III}$$

равен выражению —

$$\frac{\bar{W}'_{III}}{\hat{E}_A^2} \cdot \bar{W}'_I \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III},$$

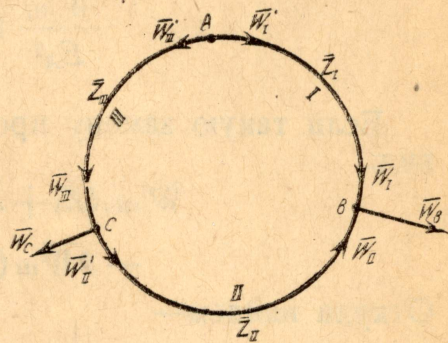


Рис. 20.

которое по своей величине можно без большого ущерба для точности всего вывода заменить выражением

$$\frac{\widehat{W}'_{III}}{E_A^2} \overline{W}'_{III} \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \widehat{Z}_{III} = \left(\frac{\overline{W}'_{III}}{E_A} \right)^2 \cdot Z_{III}^2.$$

Если такую замену произвести, тогда основное выражение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \overline{W}'_{III} \cdot (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}) - \overline{W}_c (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) - \overline{W}_b \cdot \bar{Z}_I - \\ & - \Delta \overline{W}_{III} (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) - (\Delta \overline{W}_I + \Delta \overline{W}_{II}) \cdot \bar{Z}_I = 0. \end{aligned}$$

Откуда найдем—

$$\overline{W}'_{III} = \frac{\overline{W}_c (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) + \overline{W}_b \cdot \bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} + \frac{\Delta \overline{W}_{III} (\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) + (\Delta \overline{W}_I + \Delta \overline{W}_{II}) \cdot \bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}.$$

Путем подобных же рассуждений можно получить, что

$$\overline{W}'_I = \frac{\overline{W}_c \cdot \bar{Z}_{III} + \overline{W}_b (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} + \frac{\Delta \overline{W}_{III} \cdot \bar{Z}_{III} + (\Delta \overline{W}_I + \Delta \overline{W}_{II}) (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}.$$

Потокораспределение в кольце в таком виде подчиняется тому же закону, что и в случае одиночной нагрузки. Этот закон, видимо, можно распространить теперь на случай любого количества нагрузок.

Положение 3-е. В кольцевой сети (рис. 21) нагрузку, приложенную в т. „b“, требуется разнести в тт. „a“ и „с“ так, чтобы потоки мощности, без учета потерь в сети, на участках I и IV остались без изменения.

Можно показать, что такое разнесение нагрузки $\overline{W}_c$ равносильно определению потокораспределения в кольцевой сети, если питание этой сети осуществляется при равном напряжении из точек „a“ и „с“, т. е., что составляющая нагрузки $\overline{W}_b$, приложенная в т. „a“ будет равна

$$\overline{W}_{a(b)} = \frac{\overline{W}_b \cdot \bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}$$

и что составляющая нагрузки $\overline{W}_b$, приложенная в т. „с“, будет равна

$$\overline{W}_{c(b)} = \frac{\overline{W}_b \cdot \bar{Z}_{III}}{\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}.$$

Для доказательства того положения, что на участках I и IV потокораспределение не изменилось в результате такого разнесения нагрузки $\overline{W}_b$, сравним потоки мощностей без учета потерь, напр. на участке I, до и после преобразования сети.

До преобразования

$$\overline{W}_{IV} = \frac{\overline{W}_a (\bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_I) + \overline{W}_b (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_I) + \overline{W}_c \cdot \bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}};$$

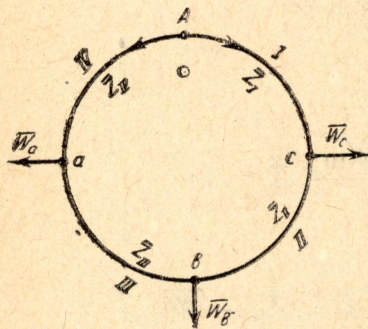


Рис. 21.

после преобразования

$$\begin{aligned}\bar{W}'_{IV} &= \frac{\left(\bar{W}_a + \frac{\bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{II}}{\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}\right) \cdot (\bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_I) + \left(\bar{W}_c + \frac{\bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{III}}{\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}\right) \cdot \bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}} = \\ &= \frac{\bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{II} \cdot \bar{Z}_{III} + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{II}^2 + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{II} \cdot \bar{Z}_{III} + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{II}^2 + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II} +}{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}) (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})} + \\ &+ \frac{\bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{III}^2 + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \bar{Z}_I + \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_{II} \cdot \bar{Z}_I + \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \bar{Z}_I + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \bar{Z}_I}{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}) (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})}\end{aligned}$$

Если теперь выражение для потока мощности в преобразованной сети умножить и разделить на сумму

$$(\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})$$

то получим:

$$\begin{aligned}\bar{W}_{IV} &= \frac{\bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{III} \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{III}^2 + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{II}^2 + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_{II} \cdot \bar{Z}_{III} + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_a \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III}}{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}) (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})} + \\ &+ \frac{\bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{II}^2 + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_{II} \cdot \bar{Z}_{III} + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III} + \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{II} + \bar{W}_c \cdot \bar{Z}_I \cdot \bar{Z}_{III}}{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV}) (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III})}\end{aligned}$$

Из полученного сравнения выражений для потоков в преобразованной и непреобразованной сети видно, что величина потоков одинакова.

Положение 4-е касается преобразования треугольника сопротивлений в звезду сопротивлений и обратно. Ход рассуждений при выводе формул преобразования и сами формулы преобразования совершенно тождественны со случаем токовой нагрузки, т. к. и в первом, и во втором случае выполняется условие равенства падений напряжений между соответствующими угловыми точками треугольника в преобразованной и непреобразованной сети.

Приведенные здесь четыре положения позволяют сложную сеть привести к виду простой, найти потокораспределение мощностей в этой простой сети и затем, трансформируя сеть обратно, определить и действительное потокораспределение во всех звеньях сети.

Вывод всех четырех положений был вполне строгим, за исключением лишь положения второго, где допущено приравливание выражений:

$$\left(\frac{W'_{III}}{E_A}\right)^2 Z_{III}^2 \text{ и } \frac{\hat{W}_{III}'}{E_A^2} \cdot \bar{W}_I' \cdot \bar{Z}_I \cdot \hat{Z}_{III}.$$

Эти члены совершенно тождественны, если соблюдено условие:

$$\frac{\bar{W}_I'}{\bar{W}_{III}'} = \frac{\bar{Z}_{III}}{\bar{Z}_I}.$$

Это условие как раз и выполнялось в случае одиночной нагрузки. В случае же двух нагрузок это условие будет выполняться лишь в частном случае. Однако, примерные подсчеты показывают, что даже в том случае, когда эта пропорция далеко не соблюдается, ошибка получается незначительной. В тоже время приравливание вышеупомянутых выражений поз-

волило дать весьма простую формулировку правилу распределения потерь в сети.

Как это показано проф. А. А. Глазуновым, обычно потери в сети могут разноситься по звеньям, идя от точки потокораздела против течения активных мощностей.

Однако, в случае наличия еще одной или нескольких точек потокораздела в сети мы в результате такого разнесения потерь приходим как бы в тупик (рис. 22 т. „3“). Если бы у нас на станции узла „3“ имелся запас некоторой мощности, тогда потери в звеньях „II“ и „III“ были бы покрыты за счет этого запаса. Но станция 3 узла учтена как станция, работающая по строго заданному графику и, следовательно, потери в звеньях II и III

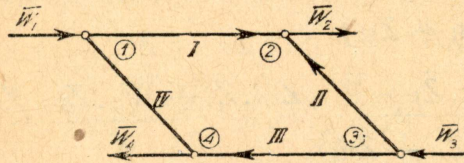


Рис. 22.

могут быть покрыты лишь за счет станции 1 узла. Но в этом случае нам необходимо знать закон распределения потерь в сети, если разнесение этих потерь не может быть осуществлено указанным выше простым способом. Такой закон и дан положением 2-м.

Полное приложение метода трансформации для случая, когда нагрузки учитываются в мощностях, показано ниже на двух различных примерах.

VII.

Требуется определить потокораспределение мощностей в звеньях и напряжения в узлах сети (рис. 23). Реактивные мощности за счет емкостей звеньев учтены в соответствующих узловых нагрузках; при этом реактивные составляющие узловых нагрузок несколько уменьшились, а реактивная составляющая мощности станции (узел „3“) несколько увеличилась.

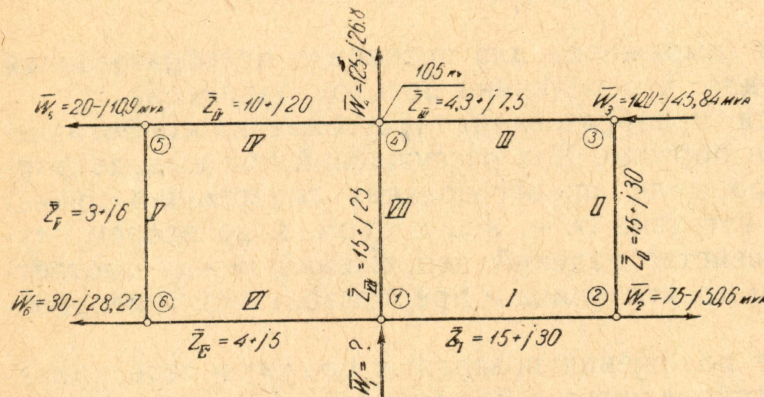


Рис. 23.

Согласно положения 3-го метода трансформации, составляющая мощностей $\bar{W}_3$ и $\bar{W}_2$, отнесенная к узлу „1“, будет равна—

$$\bar{W}_{1(2,3)} = \frac{\bar{W}_2(\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}) - \bar{W}_3 \cdot \bar{Z}_{III}}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}.$$

Знак минус перед членом $\bar{W}_3 \cdot \bar{Z}_{III}$ объясняется тем, что мощность $\bar{W}_3$ притекает в сеть и потому имеет направление, противоположное случаю когда мощность отбирается из сети.

Выражение для $\bar{W}_{1(2,3)} = P_{1(2,3)} - jQ_{1(2,3)}$ можно преобразовать так, чтобы можно было отдельно получить значения активной и реактивной составляющих. В преобразованном виде выражения для $P_{1(2,3)}$ и $Q_{1(2,3)}$ будут иметь вид:

$$P_{1(2,3)} = G_0 \{ [P_2 \cdot (R_{II} + R_{III}) - P_3 \cdot R_{III}] + [Q_2 \cdot (X_{II} + X_{III}) - Q_3 \cdot X_{III}] \} + B_0 \{ [P_2 \cdot (X_{II} + X_{III}) - P_3 \cdot X_{III}] - [Q_2 \cdot (R_{II} + R_{III}) - Q_3 \cdot R_{III}] \}.$$

и

$$Q_{1(2,3)} = -G_0 \{ [P_2(X_{II} + X_{III}) - P_3 \cdot X_{III}] - [Q_2(R_{II} + R_{III}) - Q_3 \cdot R_{III}] \} + \\ + B_0 \{ [P_2(R_{II} + R_{III}) - P_3 \cdot R_{III}] + [Q_2(X_{II} + X_{III}) - Q_3 \cdot X_{III}] \}.$$

Или в общем виде:

$$P = G_0 \cdot \Sigma (P_n \cdot R_n' + Q_n \cdot X_n') + B_0 \Sigma (P_n \cdot X_n' - Q_n \cdot R_n')$$

и

$$Q = -G_0 \Sigma (P_n \cdot X_n' - Q_n \cdot R_n') + B_0 \Sigma (P_n \cdot R_n' + Q_n \cdot X_n').$$

Здесь: G_0 и B_0 — ваттная и безваттная прородимости части сети между точками ее, в которые разносят нагрузки.

В данном случае

$$\underline{G_0} = \frac{R_I + R_{II} + R_{III}}{(R_I + R_{II} + R_{III})^2 + (X_I + X_{II} + X_{III})^2} = 0,00598 \text{ } \overline{\text{о}}$$

и

$$\underline{B_0} = \frac{X_I + X_{II} + X_{III}}{(R_I + R_{II} + R_{III})^2 + (X_I + X_{II} + X_{III})^2} = 0,01175 \text{ } \overline{\text{о}}$$

Результаты вычислений, согласно операций в скобках, малых и квадратных, сосредоточены в таблице 7.

Таблица 7.

Узлы	P_n	Q_n	R'_n	X'_n	$P_n R'_n$	$P_n X'_n$	$Q_n R'_n$	$Q_n X'_n$
2	75	50,6	19,3	37,5	1446	2810	976	1895
3	-100	-45,84	4,3	7,5	-430	-750	-197,5	-344
Σ	-25	4,76			1016	2060	779	1551

$$\Sigma (P_n R'_n + Q_n X_n') = 1016 + 1551 = 2567;$$

$$\Sigma (P_n X'_n - Q_n R'_n) = 2060 - 779 = 1281.$$

$$\text{След.: } \underline{P_{1(2,3)}} = 0,00598 \cdot 2567 + 0,01175 \cdot 1281 = 30,38 \text{ } mw$$

$$\text{и } \underline{Q_{1(2,3)}} = -0,00598 \cdot 1281 + 0,01175 \cdot 2567 = 22,62 \text{ } mva$$

$$\text{т. е. } \underline{\overline{W}_{1(2,3)}} = P_{1(2,3)} - jQ_{1(2,3)} = 30,38 - j22,62 \text{ } mva.$$

Теперь легко получим:

$$\underline{\overline{W}_{4(2,3)}} = \underline{\overline{W}_2} + \underline{\overline{W}_3} + \underline{\overline{W}_{1(2,3)}} = -25 - j4,76 - (30,38 - j22,62) = \\ = -(55,38 - j17,86) \text{ } mva.$$

Проверим вычисление $\underline{\overline{W}_{1(2,3)}}$ и $\underline{\overline{W}_{4(2,3)}}$

$$\underline{\overline{W}_{4(2,3)}} = P_{4(2,3)} - jQ_{4(2,3)},$$

При чем

$$P_{4(2,3)} = G_0 \{ [P_2 R_I - P_3 (R_I + R_{II})] + [Q_2 X_I - Q_3 (X_I + X_{II})] \} + \\ + B_0 \{ [P_2 X_I - P_3 (X_I + X_{II})] - [Q_2 R_I - Q_3 (R_I + R_{II})] \}$$

$$\text{и } Q_{4(2,3)} = -G_0 \cdot \{ [P_2 \cdot X_I - P_3 (X_I + X_{II})] - [Q_2 R_I - Q_3 (R_I + R_{II})] \} + \\ + B_0 \{ [P_2 R_I - P_3 (R_I + R_{II})] + [Q_2 X_I - Q_3 (X_I + X_{II})] \}$$

Результаты вычислений над величинами, заключенными в квадратные скобки, представлены в таблице 7а.

Таблица 7а

Узлы	P_n	Q_n	R''_n	X''_n	$P_n R''_n$	$P_n X''_n$	$Q_n R''_n$	$Q_n X''_n$
2	75	50,6	15	30	1125	2250	758	1516
3	-100	-45,84	30	60	-3000	-6000	-1377	-2754
Σ	-25	4,76			-1875	-3750	-619	-1238

$$\Sigma (P_n R''_n + Q_n X''_n) = -1875 - 1238 = -3113;$$

$$\Sigma (P_n X''_n - Q_n R''_n) = -3750 - (-619) = -3131.$$

Следовательно:

$$\underline{P}_{4(2,3)} = 0,00598 \cdot (-3113) + 0,01175 \cdot (-3131) = -55,38 \text{ мВт}$$

$$\text{и } \underline{Q}_{4(2,3)} = -0,00598 \cdot (-3131) + 0,01175 \cdot (-3113) = -17,85 \text{ мВА.}$$

Как видим, вычисления были сделаны правильно.

Нагрузки 4-го узла с учетом составляющей нагрузки 2-го и 3-го узлов—

$$\underline{W}'_4 = \underline{W}_4 + \underline{W}_{4(2,3)} = 125 - j26,8 + [-(55,38 - j17,86)] = 69,62 - j8,94 \text{ мВА.}$$

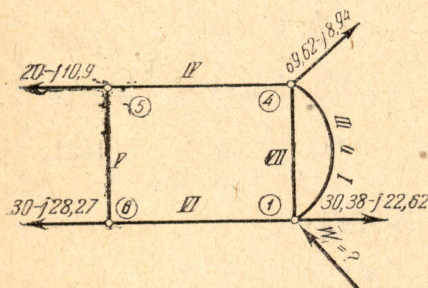


Рис. 24.

Сеть в преобразованном виде представлена на рис. 24.

Эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей между узлами „1“ и „4“—

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{VII} \cdot (\underline{Z}_I + \underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{III})}{\underline{Z}_{VII} + \underline{Z}_I + \underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{III}} = 10,45 + j18,35 \text{ }\Omega$$

В полученной таким образом кольцевой сети найдем потокораспределение мощностей.

Таблица 8.

Узлы	P_n	Q_n	R'_n	X'_n	$P_n R'_n$	$P_n X'_n$	$Q_n R'_n$	$Q_n X'_n$
4	69,62	8,94	17	31	1180	2156	151,7	276,5
5	20,00	10,90	7	11	140	220	76,3	120,0
6	30,00	28,27	4	5	120	150	113,0	141,2
Σ	119,62	48,11			1448	2526	341,0	537,7

В таблице 8 представлены результаты основных вычислений для определения потока мощности, выходящего из узла „1“ по эквивалентному звену (здесь пока не учитывается $\underline{W}_{1(2,3)}$).

Ваттная проводимость кольца

$$G'_0 = \frac{R_9 + R_{IV} + R_V + R_{VI}}{(R_9 + R_{IV} + R_V + R_{VI})^2 + (X_9 + X_{IV} + X_V + X_{VI})^2} = 0,00862 \text{ }\Omega$$

Безваттная проводимость кольца

$$B'_0 = \frac{X_s + X_{VI} + X_V + X_{VI}}{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X)^2} = 0,01545 \text{ } \bar{\text{о}}$$

$$\Sigma (P_n R'_n + Q_n X'_n) = 1440 + 537,7 = 1977,7$$

$$\Sigma (P_n X'_n - Q_n R'_n) = 2526 - 341,0 = 2185,0.$$

Следовательно:

$$P_s = 0,00862 \cdot 1977,7 + 0,01545 \cdot 2185 = 50,80 \text{ } м\text{в}$$

$$\text{и } Q_s = -0,00862 \cdot 2185 + 0,01545 \cdot 1977,7 = 11,73 \text{ } м\text{вА},$$

т. е.:

$$\bar{W}_s = P_s - j Q_s = 50,80 - j 11,73 \text{ } м\text{вА}.$$

Теперь можно найти действительный поток мощности в звене „VI“, без учета потерь, как—

$$\begin{aligned} \bar{W}_{VI} &= \bar{W}_4 + \bar{W}_5 + \bar{W}_6 - \bar{W}_s = 69,62 - j 8,94 + 20 - j 10,9 + 30 - \\ &- j 28,27 - (50,80 - j 11,73) = - (68,82 - j 36,38) \text{ } м\text{вА}^*). \end{aligned}$$

Проверим вычисление $\bar{W}_{VI}$ непосредственно по формуле потокораспределения мощности в кольце (табл. 9).

Таблица 9.

Узел	P_n	Q_n''	R_n''	X_n''	$P_n R_n''$	$P_n X_n''$	$Q_n R_n''$	$Q_n X_n''$
4	69,62	8,94	10,45	18,35	728,0	1276	93,5	164,0
5	20,00	10,90	20,45	38,35	409,0	767,0	222,6	418,0
6	30,00	28,27	23,45	44,35	704,0	1330	663,0	1253
Σ	119,62	48,11			1841,0	3373	979,1	1835

$$\Sigma (P_n R_n'' + Q_n X_n'') = 1841 + 1835 = 3676$$

$$\Sigma (P_n X_n'' - Q_n R_n'') = 3373 - 979,1 = 2393,9.$$

$$\text{След.: } P_{VI} = 0,00862 \cdot 3676 + 0,01545 \cdot 2394 = 68,72 \text{ } м\text{в}$$

$$\text{и } Q_{VI} = -0,00862 \cdot 2394 + 0,01545 \cdot 3676 = 36,25 \text{ } м\text{вА}.$$

Т. е. расхождение результатов вычислений в первом и во втором случае совершенно незначительное.

Далее найдем поток мощности в 1-м звене преобразованной сети.

$$\begin{aligned} \bar{W}_I &= \bar{W}_s \frac{\bar{Z}_s}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} = (50,80 - j 11,73) \frac{10,45 + j 18,35}{34,3 + j 67,5} = \\ &= 13,92 - j 3,93 \text{ } м\text{вА}. \end{aligned}$$

Поток мощности в 1-м звене непреобразованной сети

$$\begin{aligned} \bar{W}_I &= \bar{W}'_I + \bar{W}_{I(2,3)} = 13,92 - j 3,93 + 30,38 - j 22,52 = \\ &= 44,30 - j 26,45 \text{ } м\text{вА}. \end{aligned}$$

*) Направления мощностей слева направо принято за положительное.

Поток мощности в VII звене

$$\begin{aligned}\bar{W}_{VII} &= \bar{W}_3 - \bar{W}'_1 = 50,80 - j 11,73 - (13,92 - j 3,93) = \\ &= 36,88 - j 7,80 \text{ мва.}\end{aligned}$$

Тот же поток мощности получим непосредственно из формулы разделения эквивалентной мощности:

$$\bar{W}_{VII} = \bar{W}_3 \frac{\bar{Z}_9}{\bar{Z}_{VII}} = (50,80 - j 11,73) \frac{10,45 + j 18,35}{15 + j 25} = 37,05 - j 7,7 \text{ мВА}$$

Расхождение результатов допустимое.

Теперь имеется возможность просто (по закону Кирхгофа) найти потоки мощностей во всех звеньях непреобразованной сети.

$$\begin{aligned}\bar{W}_{II} &= \bar{W}_1 - \bar{W}_2 = 44,30 - j 26,45 - (75 - j 59,5) = \\ &= -(30,70 - j 24,15) \text{ мВА.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{W}_{III} &= \bar{W}_{II} - \bar{W}_3 = -(30,70 - j 24,15) - [-(100 - j 45,84)] = \\ &= 69,30 - j 21,69 \text{ мВА;}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{W}_{IV} &= \bar{W}_{III} + \bar{W}_{VII} - \bar{W}_4 = 36,88 - j 7,80 + 69,30 - j 21,69 - (125 - j 26,8) = \\ &= -(18,82 + j 2,72);\end{aligned}$$

$$\bar{W}_V = \bar{W}_{IV} - \bar{W}_5 = -(18,82 + j 2,72) - (20 - j 10,9) = -(38,82 - j 8,18);$$

$$\bar{W}_{VI} = \bar{W}_V - \bar{W}_6 = -(38,82 - j 8,18) - (30 - j 28,27) = -(68,82 - j 36,45).$$

Найденное таким образом потокораспределение мощностей в сети без учета потерь нанесено на схеме сети, рис. 25.

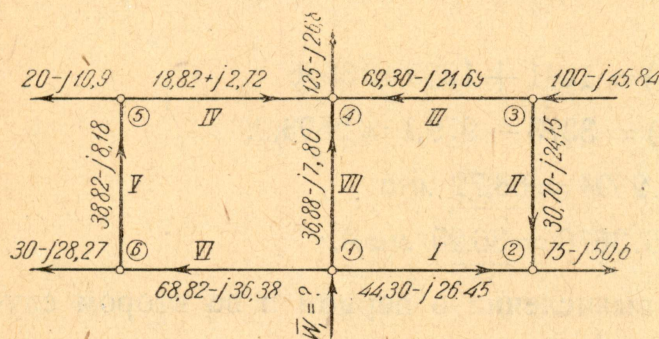


Рис. 25.

Как уже отмечено, полученное потокораспределение не учитывает потерь и потому действительные напряжения в узлах не могут быть определены по этим потокам. Тем не менее, для выяснения вопроса о размере ошибок, получаемых при вычислении напряжений по потокам без учета потерь, найдем значения узловых напряжений, согласно потокораспределения рис. 25.

Наиболее удобно вычислять напряжения, когда нагрузка звена задана в мW-ах или в мВА-ах, по формуле: *)

$$\bar{E}_{n+1} = \left(E_n + \frac{P.R + QX}{E_n} \right) + j \frac{PX - QR}{E_n},$$

откуда модуль вектора напряжения

$$E_{n+1} = \sqrt{\left(E_n + \frac{P.R + QX}{E_n} \right)^2 + \left(\frac{PX - QR}{E_n} \right)^2}$$

*) Проф. А. А. Глазунов и др. "Расчет сетей эл. систем" 1935 г. См. также проф. А. Я. Рябков "Методы определения напряжений в электропередачах и сетях 35, 110 и 220 кВ Журнал "Эл. станции" № 1, 1935 г.

Напряжение 4-го узла является заданным и равным

$$\bar{E}_4 = E_4 = 105 \text{ kv},$$

Напряжения (модули) остальных узлов будут:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_3}} &= \sqrt{\left(105 + \frac{69,30 \cdot 4,3 + 21,69 \cdot 7,5}{105}\right)^2 + \left(\frac{69,30 \cdot 7,5 - 21,69 \cdot 4,3}{105}\right)^2} = \\ &= \sqrt{109,38^2 + 4,06^2} = 109,45 \text{ kv}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_2}} &= \sqrt{\left(109,45 - \frac{30,70 \cdot 15 + 24,15 \cdot 30}{109,45}\right)^2 + \left(\frac{30,70 \cdot 30 - 24,15 \cdot 15}{109,45}\right)^2} = \\ &= \sqrt{98,63^2 + 5,13^2} = 98,80 \text{ kv}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_1}} &= \sqrt{\left(98,80 + \frac{44,30 \cdot 15 + 26,45 \cdot 30}{98,80}\right)^2 + \left(\frac{44,30 \cdot 30 - 26,45 \cdot 15}{98,80}\right)^2} = \\ &= \sqrt{113,55^2 + 9,45^2} = 113,80 \text{ kv}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_5}} &= \sqrt{\left(105 + \frac{18,82 \cdot 10 - 2,72 \cdot 20}{105}\right)^2 + \left(\frac{18,82 \cdot 20 + 2,72 \cdot 10}{105}\right)^2} = \\ &= \sqrt{106,27^2 + 3,84^2} = 106,4 \text{ kv} *) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_6}} &= \sqrt{\left(106,4 + \frac{38,82 \cdot 3 + 8,18 \cdot 6}{106,4}\right)^2 + \left(\frac{38,82 \cdot 6 - 8,18 \cdot 3}{106,4}\right)^2} = \\ &= \sqrt{107,98^2 + 1,5^2} = 107,99 \text{ kv}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{E_1}} &= \sqrt{\left(107,99 - \frac{63,82 \cdot 4 + 36,38 \cdot 5}{107,99}\right)^2 + \left(\frac{63,82 \cdot 5 - 36,38 \cdot 4}{107,99}\right)^2} = \\ &= \sqrt{112,25^2 + 1,84^2} = 112,29 \text{ kv}. \end{aligned}$$

При обходе сети мы не получили суммы падения напряжений замкнутой сети равной нулю. Значения одного и того же напряжения 1-го узла получились сравнительно разнящимися в зависимости от того, с которой стороны производился обход сети при вычислении узловых напряжений.

При движении от 4-го узла через узлы 3 и 2 получено: $E_1 = 113,80 \text{ kv}$.

При движении же от 4-го узла через узлы 5 и 6 получено: $E_1 = 112,29 \text{ kv}$.

Такой небаланс является совершенно законным, как это показано в неоднократно нами упоминаемой книге проф. А. А. Глазунова, проф. А. Я. Рябкова и доц. Ф. П. Лашкова.

В самом деле. Поток мощности на участке III (рис. 21) без учета потерь в сети будет равен

$$\bar{W}_{III} = \frac{\bar{W}_c (\bar{Z}_{II} + \bar{Z}_I) + \bar{W}_b \cdot \bar{Z}_I}{\bar{Z} + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}}.$$

*) При вычислении знаки в формуле изменились в виду того, что реактивная мощность звена IV имеет знаки +

Имея в виду, что

$$\overline{W}_c = \overline{W}_{III} - \overline{W}_{II},$$

а

$$\overline{W}_b = \overline{W}_{II} + \overline{W}_I,$$

получаем:

$$\overline{W}_{III}(\overline{Z}_I + \overline{Z}_{II} + \overline{Z}_{III}) = (\overline{W}_{III} - \overline{W}_{II})(\overline{Z}_{II} + \overline{Z}_I) + (\overline{W}_{II} + \overline{W}_I) \cdot \overline{Z}_I$$

или

$$\overline{W}_{III} \cdot \overline{Z}_{III} + \overline{W}_{II} \cdot \overline{Z}_{II} = \overline{W}_I \cdot \overline{Z}_I.$$

Но последнее соотношение может иметь место лишь в том случае, когда:

$$\frac{\overline{W}_{III}}{\overline{E}_0} \overline{Z}_{III} + \frac{\overline{W}_{II}}{\overline{E}_0} \overline{Z}_{II} = \frac{\overline{W}_I}{\overline{E}_0} \overline{Z}_I,$$

т. е. когда токи во всех звеньях получают от деления потоков мощности в этих звеньях на одно и то же напряжение. Следовательно, только в этом случае можно получить баланс напряжений в замкнутой сети, если при определении потоко-распределения мощностей не учтены потери в сети.

Найдем, далее, потери мощности в звеньях сети. Точное определение потери мощности в каждом звене возможно было бы в случае столь же точного знания величины силы тока в каждом звене. Однако, пользуясь методом трансформации, мы не имеем возможности предварительно знать точно токи в звеньях по двум причинам.

Во-первых, пока не проведен до конца расчет сети не могут быть известными узловые напряжения, соответствующие полным потокам мощностей в звеньях, а следовательно, не могут быть определенными и токи в звеньях.

Во-вторых, пока неизвестны потери в звеньях — нельзя определить полные потоки мощностей в звеньях. т. к. при точном определении потерь нужно было бы учесть не только потоки мощностей в звеньях за счет узловых нагрузок, но и также дополнительные мощности, за счет потерь в звеньях, далее расположенных от питательного пункта.

Однако, т. к. потери мощности в звеньях обычно составляют всего несколько процентов, а падение напряжения в звеньях входит лишь долей в общее значение узлового напряжения, то рекомендуется, ради сокращения процесса расчета, потери подсчитывать, определяя токи в звеньях по номинальному или среднему напряжению и потокам мощностей в звеньях без учета потерь в предыдущих звеньях. В противном случае пришлось бы, для достижения большой точности в расчетах, делать многократный пересчет.

Потери в любом звене—

$$\Delta \overline{W}_n = \Delta P_n - j \Delta Q_n = J_n^2 \cdot R_n - j J_n^2 \cdot X_n,$$

и так как

$$J_n^2 = J_a^2 + J_r^2 = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{E_n^2},$$

то

$$\Delta \overline{W}_n = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{E_n^2} \cdot R_n - j \frac{P_n^2 + Q_n^2}{E_n^2} \cdot X_n.$$

Результаты подсчета потерь мощности в звеньях сети представлены в таблице 10.

Таблица 10.

Звено	Мощность звена без учета потерь	Сопротивление звена	Потери мощности	
			Активной	Реактивной
I	44,30 — j 26,45	15 + j 30	3,31	6,63
II	30,70 — j 24,15	15 + j 30	1,89	3,78
III	69,30 — j 21,69	4,3 + j 7,5	1,865	3,26
IV	18,82 + j 2,72	10 + j 20	0,300	0,600
V	38,82 — j 8,18	3 + j 6	0,390	0,780
VI	68,82 — j 36,38	4 + j 5	2,02	2,50
VII	36,88 — j 7,80	15 + j 25	1,68	2,80

При разнесении дополнительных потоков мощностей в сети за счет подсчитанных потерь в звеньях можно поступить двояко. Можно к потоку мощностей каждого звена прибавить потерю мощности в этом лишь звене и, не обращая внимания на некоторый небаланс мощностей в узлах за счет этой операции, подсчитывать на основе вновь полученных звеньевых потоков мощностей напряжения в узлах, а нагрузку станции со свободным графиком подсчитать с учетом потерь мощности во всех звеньях. Такой подсчет значительно бы упростил учет потери в сети, но внес бы безусловно некоторую ошибку в конечные результаты расчета. Ошибка эта получилась бы, во-первых, за счет некоторой недогрузки каждого последующего звена на потери всех предыдущих звеньев, если двигаться от точки потокораздела к питательному узлу, и, во-вторых, за счет того обстоятельства, что, как это было замечено еще выше, дополнительные потоки мощностей по звеньям за счет потерь не всегда распределяются пропорционально потокам мощностей в звеньях, полученных без учета потерь. В том случае, когда имеется ни одна точка потокораздела (если не считать узла станции со свободным графиком), а несколько таких, диспропорция как раз и получается.

В нашем случае имеется две точки потокораздела мощностей (рис. 25): точки 2 и 4. Если здесь воспользоваться обычным способом разнесения потерь в сети, то, идя от точек 2 и 4 навстречу потокам активных мощностей в звеньях II и III, мы получили бы в узле 3 дополнительное требование на активную и реактивную мощность, покрыть которые в 3-м узле мы не можем, т. к. мощность 3-го узла уже распределена. Следовательно, это требование может быть удовлетворено за счет станции 1-го узла, но тогда полезно-отдаваемая мощность станции 3-го узла через звенья II и III соответственно уменьшится, а потоки мощностей звеньев в I, VII и IV в сумме на столько же увеличатся. И в частности, загрузка звена I-го будет увеличена настолько, насколько загрузка звена II-го уменьшена.

Такое механическое переложение нагрузки с одного звена на другое в равной степени логически должно было бы привести, напр., к такому абсурду: мощность 3-го узла упала до нуля, следовательно поток мощности звена II-го станет равным нулю, а звена I-го — равным нагрузке 2-го узла. т. е. 74 — j 50,6 мва.

Всего правильнее в таких случаях воспользоваться общим законом разнесения потерь в сети, обоснованном в положении 2-м метода трансформации. Согласно этого закона, потери мощности каждого звена нужно рассматривать, как дополнительную нагрузку и точкой ее приложения является конец данного звена, если взять направление течения активной мощности в этом звене.

В нашем случае, следовательно, необходимо потери звеньев I и II приложить в узле 2, потери звеньев III, IV и VII — в узле 4, звена V-го в узле 5 и звена VI-го в узле 6.

V	41,28 — j 12,61	0,39 — j 0,78	40,89 — j 11,83	{ 20 — j 10,9
IV	20,89 — j 0,93	0,30 — j 0,60	20,59 — j 0,33	

Мощность станции 1-го узла

Далее, согласно того же закона, необходимо эту дополнительную нагрузку разнести по звеньям сети по общему правилу метода трансформации.

На рис. 26 представлена сеть с нагрузками в узлах за счет потерь, причем:

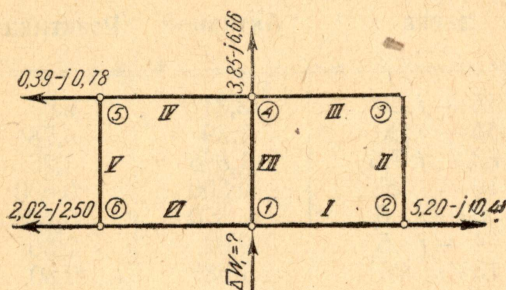


Рис. 26.

$$\begin{aligned}\Delta \bar{W}_4 &= \Delta \bar{W}_{III} + \Delta \bar{W}_{IV} + \Delta \bar{W}_{VII} \\ &= +1,865 - j3,26 + 0,30 - j0,60 + \\ &\quad 1,68 - j2,80 = \underline{3,85 - j6,66 \text{ мва}}\end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}\Delta \bar{W}_2 &= \Delta \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_{II} = 1,89 - j3,78 + \\ &\quad 3,31 - j6,63 = \underline{5,20 - j10,41 \text{ мва}}\end{aligned}$$

Порядок прямого и обратного преобразования сети тот же, что и в предыдущем.

Освобождаемся от нагрузки 2-го узла (в 3-м узле нагрузка равна нулю):

$$\begin{aligned}\Delta P_{1(2)} &= 0,00598 (5,20 \cdot 19,3 + 10,41 \cdot 37,5) + \\ &\quad + 0,01175 (5,20 \cdot 37,5 - 10,41 \cdot 19,3) = \underline{2,86 \text{ мв}} \\ \Delta Q_{1(2)} &= -0,00598 (5,20 \cdot 37,5 - 10,41 \cdot 19,3) + \\ &\quad + 0,01175 (5,20 \cdot 19,3 + 10,41 \cdot 37,5) = \underline{5,80 \text{ мВА}},\end{aligned}$$

Следовательно:

$$\Delta \bar{W}_{1(2)} = \underline{2,86 - j5,80 \text{ мва}}$$

и

$$\begin{aligned}\Delta \bar{W}_{4(2)} &= \Delta \bar{W}_2 - \Delta \bar{W}_{1(2)} = \\ &= 5,20 - j10,41 - (2,86 - j5,80) = \underline{2,34 - j4,61 \text{ мВА}}.\end{aligned}$$

Нагрузка 4-го узла преобразованной сети

$$\begin{aligned}\Delta \bar{W}'_4 &= \Delta \bar{W}_4 + \Delta \bar{W}_{4(2)} = \\ &= 3,85 - j6,66 + 2,34 - j4,61 = \underline{6,19 - j11,27 \text{ мВА}}.\end{aligned}$$

Потокораспределение в кольце. Результаты основных вычислений в таблице 11.

Таблица 11.

Узлы	ΔP_n	ΔQ_n	R_n'	X_n'	$\Delta P_n R_n'$	$\Delta P_n X_n'$	$\Delta Q_n R_n'$	$\Delta Q_n X_n'$
4	6,19	11,27	17	31	105,20	192,00	191,80	350,0
5	0,39	0,78	7	11	2,73	0,43	5,46	8,57
6	2,02	2,50	4	5	8,08	10,10	10,00	12,50
Σ	8,60	14,55			116,01	202,53	207,26	371,07

$$\Sigma (\Delta P_n R_n' + \Delta Q_n X_n') = 116,01 + 371,07 = 487,08$$

$$\Sigma (\Delta P_n X_n' - \Delta Q_n R_n') = 202,53 - 207,26 = -4,73$$

$$\Delta P_s = 0,00862 \cdot 487,08 + 0,01545 \cdot (-4,73) = \underline{4,12 \text{ мв}}$$

$$\Delta Q_s = 0,00862 \cdot (-4,73) + 0,01545 \cdot 487,08 = \underline{7,56 \text{ мВА}}.$$

т. е.

$$\Delta \bar{W}_s = \underline{4,12 - j7,56 \text{ мВА}}$$

Следовательно, поток мощности, вытекающий из узла I по звену VI, для покрытия соответствующей части потерь в сети—

$$\Delta \bar{W}_{VI} = \Delta \bar{W}'_4 + \Delta \bar{W}_5 + \Delta \bar{W}_6 - \Delta \bar{W}_9 = 4,48 - j7,00 \text{ мВА.}$$

Поток мощности, вытекающий из узла I по звену I, для покрытия соотв. части потерь в сети—

$$\begin{aligned} \Delta \bar{W}_I &= \Delta \bar{W}_9 \frac{\bar{Z}_9}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} + \Delta \bar{W}_{1(2)} = \\ &= 3,08 - j7,94 \text{ мВА.} \end{aligned}$$

Поток мощности, вытекающий из узла I по звену VII, для покрытия соответств. части потерь—

$$\begin{aligned} \Delta \bar{W}_{VII} &= \Delta \bar{W}_9 - \Delta \bar{W}_9 \frac{\bar{Z}_9}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II} + \bar{Z}_{III}} = \Delta \bar{W}_9 \frac{\bar{Z}_9}{\bar{Z}_{VII}} = \\ &= 3,08 - j5,42 \text{ мВА.} \end{aligned}$$

Полные потоки мощности в звеньях I, VI VII, с учетом потерь в сети

$$\begin{aligned} \bar{W}'_I &= \bar{W}_I + \Delta \bar{W}_I \text{ *)} = \\ &= 44,30 - j26,45 + 3,90 - j7,94 = 48,20 - j34,39 \text{ мВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{W}'_{VI} &= \bar{W}_{VI} + \Delta \bar{W}_{VI} = \\ &= 68,82 - j36,38 + 4,48 - j7,00 = 73,30 - j43,38 \text{ мВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{W}'_{VII} &= \bar{W}_{VII} + \Delta \bar{W}_{VII} = \\ &= 36,88 - j7,80 + 3,08 - j5,52 = 39,96 - j13,22 \text{ мВА.} \end{aligned}$$

Потоки мощностей, с учетом потерь, в начале и конце каждого звена всей сети (считая за начало узел, из которого вытекает активная мощность) представлены в таблице 12.

Таблица 12.

Звено	Мощность в начале звена	Потери мощности в звене	Мощности в конце звена	Нагрузка узла, в котором сопряг. звенья
I	48,20 — j 34,39	3,31 — j 6,63	44,89 — j 27,76	{ 75 — j 50,6 —(100 — j 45,84)
II	32 — j 26,62	1,89 — j 3,78	30,11 — j 22,84	
III	68 — j 19,22	1,87 — j 3,26	66,13 — j 15,96	
VII	39,96 — j 13,22	1,68 — j 2,80	38,28 — j 10,42	{ 30 — j 28,27 20 — j 10,9
VI	73,30 — j 43,38	2,02 — j 2,50	71,28 — j 40,88	
V	41,28 — j 12,61	0,39 — j 0,78	40,89 — j 11,83	
IV	20,89 — j 0,93	0,30 — j 0,60	20,59 — j 0,33	

Мощность станции 1-го узла

$$\begin{aligned} \bar{W}'_1 &= \bar{W}'_I + \bar{W}'_{VII} + \bar{W}'_{VI} + \bar{W}_{Ic} = 482,0 - \\ &- j34,39 + 39,96 - j13,22 + 73,90 - j43,38 + W_{Ic} = 161,46 - j90,99 + jW_{Ic} \text{ **).} \end{aligned}$$

*) Нужно помнить, что $\Delta \bar{W}_I, \Delta \bar{W}_{II}, \dots$ и т. д. означают не потери в звеньях I, II и т. д., а дополн. мощности, протекающие в этих звеньях и покрывающие потери в сети.

**) W_{Ic} — реактивная мощность в первом узле за счет емкостей звеньев I, VII и VI.

С другой стороны, та же мощность должна получиться как

$$\begin{aligned}\overline{W}_1' &= \overline{W}_2 + \overline{W}_3 + \overline{W}_4 + \overline{W}_5 + \overline{W}_6 + \Sigma \Delta \overline{W} + \overline{W}_{1c} = 75 - j50,6 + \\ &+ [- (100 - j45,84)] + 125 - j26,8 + 20 - j10,9 + 30 - j28,27 + \\ &+ (3,31 - j6,63 + 1,89 - j3,78 + 1,865 - j3,26 + 0,30 - j0,60 + 0,39 - j0,78 + \\ &+ 2,02 - j2,50 + 1,68 - j2,80) + jW_{1c} = 161,46 - j91,08 + jW_{1c}.\end{aligned}$$

Напряжения в узлах на основе найденного потокораспределения мощностей в сети получим как:

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= \sqrt{\left(E_4 + \frac{P_{VII} \cdot R_{VII} + Q_{VII} \cdot X_{VII}}{E_4}\right)^2 + \left(\frac{P_{VII} \cdot X_{VII} - Q_{VII} \cdot R_{VII}}{E_4}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(105 + \frac{38,28 \cdot 15 + 10,42 \cdot 25}{105}\right)^2 + \left(\frac{38,28 \cdot 25 - 10,42 \cdot 15}{105}\right)^2} = \\ &= \sqrt{112,98^2 + 7,62^2} = 113,23 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_3 &= \sqrt{\left(E_4 + \frac{P_{III} \cdot R_{III} + Q_{III} \cdot X_{III}}{E_4}\right)^2 + \left(\frac{P_{III} \cdot X_{III} - Q_{III} \cdot R_{III}}{E_4}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(105 + \frac{66,13 \cdot 4,3 + 15,96 \cdot 7,5}{105}\right)^2 + \left(\frac{66,13 \cdot 7,5 - 15,96 \cdot 4,3}{105}\right)^2} = \\ &= \sqrt{108,83^2 + 4,04^2} = 108,91 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_2 &= \sqrt{\left(108,91 - \frac{32,00 \cdot 15 + 26,62 \cdot 30}{108,91}\right)^2 + \left(\frac{32,00 \cdot 30 - 26,62 \cdot 15}{108,91}\right)^2} = \\ &= \sqrt{97,14^2 + 5,15^2} = 97,3 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= \sqrt{\left(97,30 + \frac{44,89 \cdot 15 + 27,76 \cdot 30}{97,30}\right)^2 + \left(\frac{44,89 \cdot 30 - 27,76 \cdot 15}{97,30}\right)^2} = \\ &= \sqrt{112,8^2 + 9,55^2} = 113,21 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_5 &= \sqrt{\left(E_4 + \frac{P_{IV} \cdot R_{IV} + Q_{IV} \cdot X_{IV}}{E_4}\right)^2 + \left(\frac{P_{IV} \cdot X_{IV} - Q_{IV} \cdot R_{IV}}{E_4}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(105 + \frac{20,59 \cdot 10 + 0,33 \cdot 20}{105}\right)^2 + \left(\frac{20,59 \cdot 20 - 0,33 \cdot 10}{105}\right)^2} = \\ &= \sqrt{107,06^2 + 3,95^2} = 107,13 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_6 &= \sqrt{\left(107,13 + \frac{40,89 \cdot 3 + 11,83 \cdot 6}{107,13}\right)^2 + \left(\frac{40,89 \cdot 6 - 11,83 \cdot 3}{107,13}\right)^2} = \\ &= \sqrt{108,93^2 + 1,95^2} = 108,96 \text{ kv}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= \sqrt{\left(108,96 + \frac{71,28 \cdot 4 + 40,88 \cdot 5}{108,96}\right)^2 + \left(\frac{71,28 \cdot 5 - 40,88 \cdot 4}{108,96}\right)^2} = \\ &= \sqrt{113,44^2 + 1,75^2} = 113,42 \text{ kv}.\end{aligned}$$

Некоторая расхожимость значений напряжения E_1 можно объяснить, с одной стороны, недостаточной точностью вычислений на линейке и с другой — некоторой неточностью учета потерь в сети.

Результаты расчета всей системы нанесены на рис. 27.

Если теперь сравнить значения узловых напряжений, полученных в результате расчетов по методу узловых уравнений, по методу трансформации без учета потерь и по методу трансформации с учетом потерь (таблица 13), то можно сделать вывод, что последние результаты расчета, если и различаются с таковыми же, полученными по методу узловых уравнений, то эти различия носят почти постоянный характер, т. е. во всех узлах значения напряжений по методу транс-

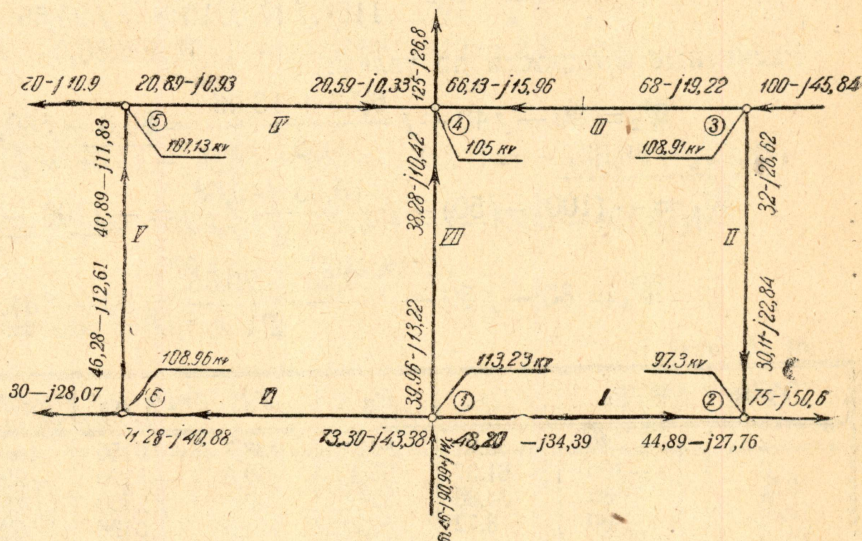


Рис. 27.

Таблица 13.

У з л ы	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
Методы расчета						
Метод узловых уравнений . .	114,8 113,8	98,15	109,9	105	107,82	110,4
Метод трансф. без учета потерь	112,29	98,80	109,45	105	106,4	107,99
Метод трансф. с учетом потерь	113,23	97,3	108,91	105	107,13	108,96

формации ниже примерно на 1 kv значений напряжений по методу узловых уравнений. Это обстоятельство указывает видимо на то, что при определении колебания напряжений в узлах результаты расчетов по первому и второму способу, возможно, будут отличаться незначительно.

Однако окончательных выводов о степени точности расчетов по методу трансформации на основании только результатов расчета выше разобранного примера нельзя сделать, так как в этом примере преобладают звенья короче 100 км. Поэтому проведем еще один расчет методом трансформации, в котором длина всех звеньев свыше 100 км.

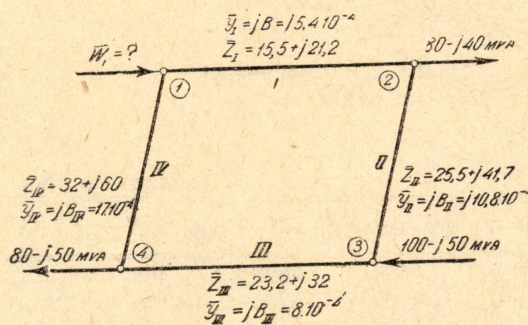


Рис. 28.

На рис. 28 представлены отправные данные второго примера сложной системы.

IV	26,76 — j 13,06	1,05 — j 1,965	25,71 — j 11,09	{ 80 — j 34,88
--------------	-----------------	----------------	-----------------	----------------

При номинальном напряжении 110 кВ найдем реактивные мощности за счет емкостей звеньев и разнесем найденные мощности по узлам.

Для звена I... $110^2 \cdot j \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} = j \cdot 6,53 \text{ мВА}$

" " II... $110^2 \cdot j \cdot 10,8 \cdot 10^{-4} = j \cdot 13,06 \text{ "}$

" " III... $110^2 \cdot j \cdot 8,0 \cdot 10^{-4} = j \cdot 9,68 \text{ "}$

" " IV... $110^2 \cdot j \cdot 17,0 \cdot 10^{-4} = j \cdot 20,56 \text{ "}$

Расчетные мощности по узлам:

$$\bar{W}_2 = 80 - j40 + j \frac{6,53 + 13,06}{2} = 80,0 - j80,21 \text{ мВА}$$

$$\bar{W}_3 = -(100 - j50) + j \frac{13,06 + 9,68}{2} = -(100 - j61,37) \text{ мВА}$$

$$\bar{W}_4 = 80 - j50 + j \frac{9,68 + 20,56}{2} = 80 - j34,88 \text{ мВА}$$

Таблица 14

Узлы	P_n	Q_n	R_n'	X_n'	$P_n R_n'$	$P_n X_n'$	$Q_n R_n'$	$Q_n X_n'$
2	80	30,21	80,7	133,7	6456	10696	2438	4039
3	-100	-61,37	55,2	92,0	-5520	-9200	-3388	-5646
4	80	34,88	32	60,0	2560	4800	1116	2093
Σ	60	3,72	96,2	154,9	3496	6296	166	486

Согласно данным табл. 14, имеем:

$$\Sigma (P_n R_n' + Q_n X_n') = 3496 + 486 = 3982;$$

$$\Sigma (P_n X_n' - Q_n R_n') = 6296 - 166 = 6130;$$

$$G_0 = \frac{96,2}{96,2^2 + 154,9^2} = 0,00289 \text{ в},$$

$$B_0 = \frac{154,9}{96,2^2 + 154,9^2} = 0,00467 \text{ в}.$$

След.,

$$P_1 = 0,00289 \cdot 3982 + 0,00467 \cdot 6130 = 40,11 \text{ мВт}$$

и

$$Q_1 = 0,00289 \cdot 6130 + 0,00467 \cdot 3981 = 0,88 \text{ мВА}.$$

Т. е.

$$\bar{W}_1 = P_1 - j Q_1 = 40,11 - j 0,88 \text{ мВА}.$$

и

$$\bar{W}_{IV} = \bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \bar{W}_4 - \bar{W}_1 = 19,89 - j 2,84 \text{ мВА}.$$

Проверим вычисление $\bar{W}_{IV}$ (табл. 15).

Таблица № 15.

Узлы	P_n	Q_n	R_n''	X_n''	$P_n R_n''$	$P_n X_n''$	$Q_n R_n''$	$Q_n X_n''$
2	80	30,21	15,5	21,2	1239	1696	468	641
3	-100	-61,37	41	62,9	-4100	-6290	-2515	-3860
4	80	34,88	64,2	94,9	5130	7590	2232	3300
Σ	60	3,72	96,2	154,9	2268	2996	185	81

$$\Sigma (P_n \cdot R_n'' + Q_n \cdot X_n'') = 2349$$

$$\Sigma (P_n \cdot X_n'' - Q_n \cdot R_n'') = 2811.$$

След.:

$$P_{IV} = 0,00289 \cdot 2349 + 0,00467 \cdot 2811 = \underline{19,89} \text{ мв}$$

и

$$Q_{IV} = -0,00289 \cdot 2811 + 0,00467 \cdot 2349 = \underline{2,83} \text{ мВА.}$$

Теперь найдем:

$$\overline{W}_{II} = \overline{W}_I - \overline{W}_2 = 40,11 - j0,88 - (80 - j30,21) = -(39,89 - j29,33)$$

$$\begin{aligned} \overline{W}_{III} &= \overline{W}_{II} - \overline{W}_3 = -(39,89 - j29,33) - [-(100 - j61,37)] = \\ &= \underline{60,11 - j32,04 \text{ мВА.}} \end{aligned}$$

Потери в звеньях см. таблица 16.

Таблица № 16.

Звено	Мощность звена без учета потерь	Сопrotивление звена	Потери мощности	
			Активн.	Реактивн.
I	40,11 — j 0,88	15,5 + j 21,2	2,027	2,86
II	39,89 — j 29,33	25,5 + j 41,7	5,17	8,41
III	60,11 — j 32,04	23,2 + j 32	8,92	12,27
IV	19,89 — j 2,84	32 + j 60	1,05	1,965

Распределение потерь в сети — см. таблица 17.

Таблица № 17.

Узлы	ΔP_n	ΔQ_n	R_n'	X_n'	$\Delta P_n \cdot R_n'$	$\Delta P_n \cdot X_n'$	$\Delta Q_n \cdot R_n'$	$\Delta Q_n \cdot X_n'$
2	7,197	11,270	80,7	133,7	580,0	962	910	1507
4	9,970	14,235	32	60	318,2	597	456	853
Σ	18,167	25,505	—	—	898,2	1559	1366	2360

$$\Sigma (\Delta P_n \cdot R_n' + \Delta Q_n \cdot X_n') = 3258,2,$$

$$\Sigma (\Delta P_n \cdot X_n' - \Delta Q_n \cdot R_n') = 193.$$

След.:

$$\Delta P_I = 0,00289 \cdot 3258,2 + 0,00467 \cdot 193 = \underline{10,3} \text{ мв}$$

и

$$\Delta Q_I = 0,00289 \cdot 193 + 0,00467 \cdot 3258,2 = \underline{14,59} \text{ мВА,}$$

т. е.

$$\Delta \overline{W}_I = \underline{10,3 - j14,59 \text{ мВА.}}$$

Полные потоки мощностей (с учетом потерь) в начале и конце каждого звена (начало звена — узел, откуда вытекает активная мощность) представлены в таб. 18.

Таблица № 18.

Звено	Мощность в начале звена	Потери мощности в звене	Мощности в конце звена	Отбор мощности в узле
I	50,41 — j 15,47	2,027 — j 2,86	48,18 — j 12,61	$\left\{ \begin{array}{l} 80 - j30,21 \\ -(100 - j61,37) \\ 80 - j34,88 \end{array} \right.$
II	36,79 — j 26,31	5,17 — j 8,41	31,62 — j 17,90	
III	63,21 — j 35,06	8,92 — j 12,27	54,29 — j 23,79	
IV	26,76 — j 13,06	1,05 — j 1,965	25,71 — j 11,09	

Узловые напряжения:

$$E_1 = \sqrt{\left(105 + \frac{48,38 \cdot 15,5 + 12,61 \cdot 21,2}{105}\right)^2 + \left(\frac{48,38 \cdot 21,2 + 12,61 \cdot 15,5}{105}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{114,69^2 + 7,89^2} = 114,96 \text{ kv}$$

$$E_2 = 105 \text{ kv (задано)}$$

$$E_3 = \sqrt{\left(105 + \frac{31,62 \cdot 25,5 + 17,9 \cdot 41,7}{105}\right)^2 + \left(\frac{31,62 \cdot 41,7 + 16,9 \cdot 25,5}{105}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{119,8^2 + 8,17^2} = 120,08 \text{ kv}$$

$$E_4 = \sqrt{\left(120,08 - \frac{63,21 \cdot 23,2 + 35,06 \cdot 32}{120,08}\right)^2 + \left(\frac{63,21 \cdot 32 - 35,06 \cdot 23,2}{120,08}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{98,5^2 + 10^2} = 99 \text{ kv}$$

$$E_1 = \sqrt{\left(99 + \frac{25,71 \cdot 32 + 11,09 \cdot 60}{99}\right)^2 + \left(\frac{25,71 \cdot 60 - 11,09 \cdot 32}{99}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{114,1^2 + 11,3^2} = 114,7 \text{ kv.}$$

Результаты расчета второго примера сложной системы методом трансформации представлены на рис. 29.

Сравнение результатов таб. 19 и 20 расчетов 2-го примера методом трансформации и методом узловых уравнений показывает, что метод трансформации ни в какой мере не является методом расчета, дающим полное представление об электрическом состоянии системы, так как и в значениях узловых напряжений, и в значениях потоков мощностей в звеньях, полученных этим методом, имеются заметные отклонения от истинных значений. Но однако, именно по результатам этого примера, где звенья имеют длину свыше 100 км (некоторые — 200 км), можно сделать вывод,

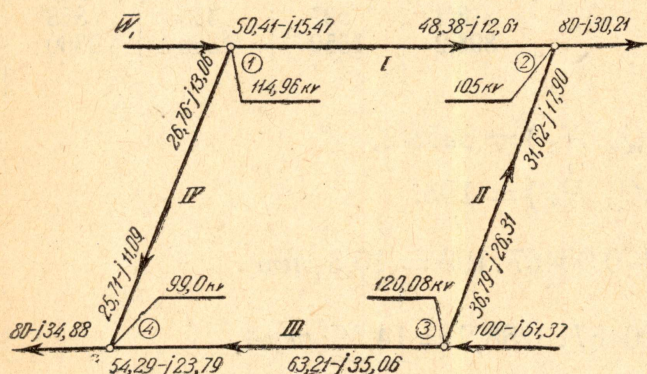


Рис. 29.

что для огромного большинства практических расчетов точность полученных результатов расчета по методу трансформации будет вполне достаточна. Значительные отклонения значений реактивных мощностей в звеньях от ис-

Таблица № 19.

Метод расчета \ Узлов. напряжен.	E_1	E_2	E_3	E_4
По методу узловых ур-ний	111,63	105	121,5	99,4
По методу трансформации	114,96 114,7	105	120,08	99,0

Таблица № 20.

З в е н о		Метод трансформации	Метод узловых уравнений
I	{ В начале	50,41 — j 15,47	49,5 — j 8
	{ В конце	48,38 — j 12,61	46,3 — j 12,0
II	{ В начале	36,79 — j 26,31	36,0 — j 18,0
	{ В конце	31,62 — j 17,90	33,0 — j 27,2
III	{ В начале	63,21 — j 35,06	64,4 — j 32,5
	{ В конце	54,29 — j 23,79	56,0 — j 30,5
IV	{ В начале	26,76 — j 13,06	26,2 — j 2,7
	{ В конце	25,71 — j 11,09	24,5 — j 18,3

тинных значений не может иметь большого практического значения, т. к. модули общих потоков мощностей определяются, главным образом, активными составляющими.

VIII.

Удачное решение вопроса предложено в работе инж. инж. Баскакова и Соловьева *). По этому способу прежде находят распределение мощностей по звеньям системы, а уже затем определяют напряжения в узлах. Для нахождения распределения мощностей по звеньям необходимо решить систему уравнений вида:

$$\Sigma (aR + bX) = 0$$

$$\Sigma (aX - bR) = 0,$$

при чем число уравнений равно удвоенному числу замкнутых контуров системе.

Выражения

$$aR + bX = 0$$

и

$$aX - bR = 0$$

составляются для каждого звена, обходя каждый замкнутый контур, положим, слева направо. Символы „a“ и „b“ представляют собою т. н. среднюю ваттную и безваттную нагрузку данного звена, выраженную через известные нагрузки в узлах и подлежащую определению нагрузку к. л. звена, принимаемого за исходный.

Модули напряжений в узлах затем определяются по выражениям:

$$E_1^2 - E_2^2 = 2(aR + bx)_I$$

$$E_2^2 - E_3^2 = 2(aR + bx)_{II}$$

$$\vdots$$

и т. д.

И, наконец, углы между векторами находят из уравнений:

$$E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \sigma_{12} = (ax - bR)_I$$

$$E_2 \cdot E_3 \cdot \sin \sigma_{23} = (ax - aR)_{II}$$

$$\vdots$$

и т. д.

*) Вывод расчетных уравнений по этому способу опускается, как уже достаточно хорошо известный. Интересующихся можно отослать напр. к книге инж. Степанова „Расчет электрич. сетей“, или к книге проф. А. А. Глазунова и др. „Расчет сетей энергетич. систем“

Так как в основу вывода расчетных уравнений по этому способу положено понятие средней мощности звена, то и весь способ можно кратко именовать „Способом средних мощностей“ (хотя его можно было бы так же именовать, как способ „контурных уравнений“).

Способ средних мощностей является способом приближенным, хотя необходимо отметить, что при желании и некоторых дополнительных просчетах, результаты расчета могут быть получены вполне удовлетворительными.

Приближенным этот метод является потому, что, во-первых, в основание вывода расчетных формул положена П-образная схема замещения звеньев, позволившая принять ток каждого звена неизменным по всей его длине. Во-вторых, метод средних мощностей требует предварительного разнесения потерь в звеньях по узлам, и весь дальнейший процесс расчета ведется в предположении отсутствия потерь в звеньях. Несомненно, всякое предположительное определение потерь будет вносить в расчет ошибку, большую или меньшую в зависимости от удачности предположения. Ошибка может быть сделана сколько угодно малой лишь в результате повторных просчетов, когда каждый последующий расчет будет проводиться с учетом потерь на основании предыдущего. Инж. инж. Баскаков и Соловьев рекомендуют расчет вести, считая потери в звеньях и реактивные мощности за счет емкостных токов, как бы уже включенными в нагрузки по подстанциям, заявленные потребителями. Такое предположение оправдывается авторами тем, что заявки потребителей на потребную им мощность не являются абсолютно точными и имеют отклонения $\pm 5\%$ от действительно потребляемых мощностей по п/станциям.

С этим предложением нужно, видимо, согласиться, но опять в предположении ориентировочных расчетов. Для окончательных подсчетов напряжений в узлах неточности, получающиеся при пренебрежении потерями и емкостными мощностями по звеньям, могут быть иногда видимо неприемлемы. Последнее подтверждается сравнением результатов расчета примера по методу средних мощностей, с указанным допущением, приведенного в статье инж. инж. Баскакова и Соловьева, с результатами расчета по упрощенному методу узловых уравнений (табл. 21), при чем, как это было показано, последние результаты очень близки к истинным на основе П-образной схемы замещения.

Таблица № 21

Напряжения в узлах	По методу узловых уравнений	По методу средних мощностей
E_1	114,8	113,93
E_2	98,15	97,63
E_3	109,9	109,24
E_5	107,82	107,28
E_6	110,4	109,33

Сравнение значений напряжений по узлам показывает, что даже в этом примере, где звенья, главным образом, короче 100 км, ошибка, при подсчетах по методу средних мощностей без учета потерь и емкостных мощностей в звеньях, является заметной. Видимо, необходимо сделать вывод, что для получения вполне удовлетворительных результатов расчетов по методу средних мощностей необходимо производить, по крайней мере, один дополнительный повторный пересчет.

Следующее допущение, которому и обязан, главным образом, метод средних мощностей своей сравнительной простотой, заключается в приравнивании нулю выражения $\sum E_m \cdot E_n S_{mn} \sigma_{mn}$, благодаря чему явилась возможность получить соотношение

$$\sum (ax - bR) = 0$$

Нужно признать, что ошибка, получающаяся в силу этого последнего допущения, особенно в свете уже ранее сделанных допущений, незначительна. Но нельзя, однако, согласиться с доказательством в пользу последнего допущения, приводимым авторами. В самом деле. Казалось бы прямой путь доказательства того, что выражение

$$\sum E_m \cdot E_n \cdot \sin \sigma_{mn}$$

можно приравнять нулю, должен был бы заключаться в сравнении величины его с величинами, вместе с которыми оно входит в общее выражение

$$\sum (ax - bR) = \sum E_m \cdot E_n \sin \sigma_{mn},$$

т. е. нужно бы сравнить, положим

$$\sum bR + \sum E_m E_n \cdot \sin \sigma_{mi}$$

и

$$\sum bR$$

и уже отсюда сделать заключение о возможности допустить, что

$$\sum bR + \sum E_m \cdot E_n \cdot \sin \sigma_{mn} \approx \sum bR,$$

т. е.

$$\sum E_m E_n \sin \sigma_{mn} \approx 0.$$

Однако, доказательство возможности

$$\sum E_m \cdot E_n \cdot \sin \sigma_{mn} \approx 0$$

авторы разбираемого метода видят в том, что величина площадки $E_1 E_2 E_3 E_4 E_5$ (рис. 30) мала в сравнении с площадками треугольников: $OE_1 E_2$, $OE_2 E_3$... и т. д. Вполне возможно, что это и так, но какое же отсюда основание считать, что

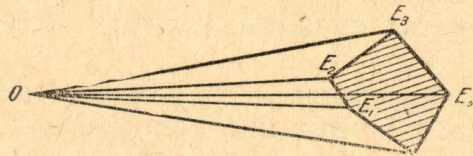


Рис. 30.

$$\sum (ax - bR) = 0?$$

Необходимо также отметить, что повторный пересчет, с целью учета потерь мощности в звеньях требует составления новой системы уравнений и, следовательно, нового решения системы уравнений с несколькими неизвестными.

Число неизвестных зависит от числа замкнутых контуров системы, причем каждый контур представляется двумя неизвестными.

IX.

Инж. Б. И. Певзнер в 1933 г. *) предложил приложить метод суперпозиции к расчету сложных систем. На разборе этого способа расчета сложных систем необходимо остановиться более подробно, ибо, на первый взгляд, может показаться, что этим способом расчета отвергаются утверждения, сделанные в начале настоящей работы о том, что: „всякое точное решение задачи о расчете напряжений и потокораспределения в сложных системах, какими бы методами оно ни проводилось, в конечном счете приведет к системе уравнений второго порядка“, и что: „эти решения (т. е. не имеющие дела с системой уравнений второго порядка), видимо, неизбежно должны быть связаны с рядом допущений“.

*) Инж. Певзнер Б. И. „Электрический расчет сложных систем“. Электричество 1933 г. № 6—7.

Инж. Певзнер же предложил способ расчета, рекомендуемый им, как способ точный, не связанный с необходимостью решать систему уравнений второго порядка. Но, как будет показано ниже, инж. Певзнер в процессе своих суждений допустил одну неточность, принципиального свойства, приводящую предлагаемый им способ расчета в разряд, в лучшем случае, приближенных.

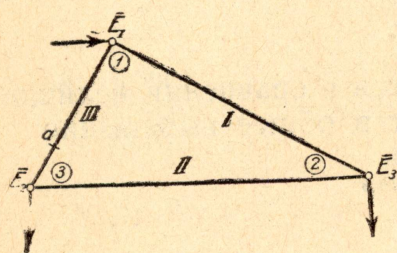


Рис. 31.

Суть предложения заключается в следующем. Замкнутая система (рис. 31) разрезается в точке,

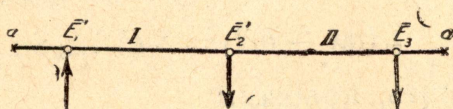


Рис. 32.

положим, „а“ и рассматривается, вначале, как сеть радиальная (рис. 32).

В этом случае, если задаться напряжением в т. „3“, можно помощью хорошо известных методов расчета разомкнутых линий передач найти напряжения в т. т. „2“ и „1“. Затем звено III вновь сопрягается в т. „а“ и определяется уравнивающий ток в контуре, протекаемый под разностью напряжений $\bar{E}_3$ и $\bar{E}_1$.

Дополнительные падения напряжений в звеньях, вызванные уравнивающим током, приплюсовываются к напряжениям, ранее найденным.

Полученные таким образом напряжения считаются истинными.

Легко видеть, что здесь допущена ошибка. Первое состояние — радиальное — системы определялось нагрузками в узлах или, в конечном счете, токами в узлах. Именно, только совершенно определенные токи в узлах, и, следовательно, и в звеньях, вызывали столь же определенные падения напряжения в звеньях и, в конечном счете, напряжения в узлах. Задача была бы решена в том случае верно, если бы наложение уравнивающих токов не изменило бы токов первого состояния в узлах системы. Однако этого то как раз и невозможно себе представить.

Изменение напряжений в узлах за счет уравнивающих токов вызовет обязательно соответствующее изменение токов нагрузки при условии неизменных мощностей в узлах. Таким образом, основное условие суперпозиции — неизменность условий в узловых точках цепи — не сохраняется.

Все сказанное можно выразить формулой: суперпозиция мощностей является невозможной *). Последнее положение является достаточно известным и доказанным.

Далее, можно показать, что разбираемый способ расчета напряжений и нагрузок в сложных системах нельзя рекомендовать и в качестве приближенного способа расчета, т. к. он является громоздким. По словам автора, аналитическое решение задачи по его способу чрезмерно громоздко. Поэтому автор предлагает решение выполнять графически. Весь процесс расчета при этом составляется из следующих этапов:

- 1) разрезать кольцо, превратив сеть в радиальную;
- 2) найти распределение мощностей в радиальной сети;
- 3) найти напряжения в точках разреза сети;
- 4) найти уравнивающий ток и распределение последнего по участкам сети;
- 5) найти падения напряжения от уравнивающего тока;
- 6) построить диаграмму напряжений для замкнутой сети и определить напряжения в точках сети.

Нужно учесть, к тому же, что каждый замкнутый контур системы требует проведения всех выше перечисленных операций, и кроме того, графический способ расчета, имея вообще ряд преимуществ, в данном слу-

*) Если речь идет о точных расчетах.

чае может явиться весьма неудобным, по причине необходимости откладывать и измерять очень малые углы и векторы.

Тем не менее принцип уравнильных токов и уравнильных мощностей может быть использован во многих случаях расчетов сетей энергетических систем, как это показал проф. А. А. Глазунов. Так, напр., в случае расчета сети сложной системы, имеющей несколько рабочих напряжений, при чем связь отдельных частей сети с различными рабочими напряжениями производится через трансформаторы (рис. 33), а коэффициенты трансформации последних не дают при перемножении единицы, т. е. не имеется возможности приведения всех звеньев в сети к одному рабочему напряжению, — в этом случае в замкнутой сети будут иметь место уравнильные токи, накладывающиеся на основные токи звеньев сети.

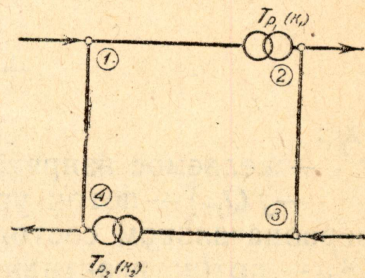


Рис. 33.

В сети, изображенной на рис. 33, положим произведение коэфф. трансформации „ K_1 “ и „ K_2 “ трансформаторов T_{p1} и T_{p2} не равно единице, тогда на мощности звеньев, подсчитанные при условии, что $K_1 \cdot K_2 = 1$, должны быть наложены дополнительные мощности, протекающие в сети за счет электродвиж. силы, равной

$$\Delta E = E_n \cdot K_1 \cdot K_2 - E_n,$$

где E_n — напряжение, к которому была приведена сеть при расчете ее, без учета уравнильных мощностей.

Принцип уравнильных токов может быть использован также для подсчета величины, необходимой реактивной мощности для повышения или понижения напряжения в данном узле сети, если того требуют условия эксплуатации. Напр., в результате расчета сети в главе VII (рис. 29), в 3-м узле получено напряжение 120,08 *kV*, не удовлетворяющее, положим, требованиям эксплуатации станции 3-го узла. Положим, требуется довести напряжение на станции 3-го узла до 112 *kV*, сохранив при этом напряжение станции 1-го узла на уровне 114,96 *kV*, и при этом условии найти напряжения 2-го и 4-го узлов. Рассуждаем в данном случае так. Разность напряжений между станциями узлов 1 и 3 может поддерживаться лишь за счет протекания от одной из вышеупомянутых станций к другой уравнильной мощности; нужно изменить величину этой уравнильной мощности так, чтобы разность

$$E_3 - E_1 = 120,08 - 114,96 = 5,12 \text{ } kV$$

изменилась и стала бы равной

$$E'_3 - E_1 = 112,0 - 114,96 = -2,96 \text{ } kV,$$

т. е. иначе говоря, нужно дополнительно к ранее протекающей уравнильной мощности прибавить еще поток мощности, протекающий от одной станции к другой с тем, чтобы, сохраняя неизменным уровень потенциала в узле 1, в то же время понизить уровень потенциала узла 3-го на

$$5,12 + 2,96 = 120,08 - 112 \cong 8 \text{ } kV.$$

И далее, — так как нам в данном случае совершенно не важно, какое взаимное напряжение будут иметь векторы напряжений узлов 1 и 3, то

мы можем эту дополнительную уравнительную мощность определить как целиком реактивную и величину ее найти из соотношения

$$E_1^2 = \left[E'_3 + \frac{P_{ур} \cdot R + (Q_{ур} + Q'_{ур}) \cdot X}{E'_3} \right]^2 + \\ + \left[\frac{P_{ур} \cdot X - (Q_{ур} + Q'_{ур}) \cdot R}{E'_3} \right]^2,$$

где:

E'_3 — желаемое напряжение в точке „3“;

$(P_{ур} - j Q_{ур})$ — поток уравнительной мощности между узлами „1“ и „3“ при первоначальном состоянии сети;

$Q'_{ур}$ — поток реактивной уравнит. мощности, дополнительно транспортируемой от узла „1“ к узлу „3“ в целях изменения напряжения узла „3“.

Это выражение можно упростить, сделав допущение, что модуль вектора напряжения E_1 равен продольной составляющей этого вектора, т. е. что

$$E_1 = E_3 + \frac{P_{ур} \cdot R + Q_{ур} \cdot X}{E_3} -$$

до наложения уравнительной мощности и

$$E_1 = E'_3 + \frac{P_{ур} \cdot R + (Q_{ур} + Q'_{ур}) \cdot X}{E'_3} -$$

после наложения дополнительной реактивной мощности.

Из последних двух соотношений получаем

$$-(E_3 - E'_3) = -\Delta E = \\ = \frac{P_{ур} \cdot R + Q_{ур} \cdot X}{E_3} - \frac{P_{ур} \cdot R + Q_{ур} \cdot X}{E'_3} - \frac{Q'_{ур} \cdot X}{E'_3}.$$

Для определения величины потока мощности, протекающего между узлами „1“ и „3“ и поддерживающего разность потенциалов между этими узлами, разнесем нагрузки узлов „2“ и „4“ в узлы „1“ и „3“. При этой последней операции нужно учесть также нагрузки за счет потерь в сети.

$$\bar{W}_{3(2)} = \bar{W}_2 \frac{\bar{Z}_I}{\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}} = \frac{26,2 \angle 54^\circ}{75,2 \angle 57^\circ} \cdot 85,6 \angle -20^\circ 42' = \\ = 29,9 \angle -23^\circ 42' = 27,3 - j12,0 \text{ мва.}$$

$$\bar{W}_{3(4)} = \bar{W}_4 \frac{\bar{Z}_{IV}}{\bar{Z}_{IV} + \bar{Z}_{III}} = 87,2 \angle -23^\circ 36' \frac{67,8 \angle 61^\circ 54'}{107,3 \angle 59^\circ} = \\ = 55,1 \angle -20^\circ 42' = 51,5 - j19,4 \text{ мва.}$$

К найденным мощностям нужно бы еще прибавить потери за счет транспортировки этих мощностей по звеньям III и II, но у нас известны потери в этих звеньях, соответствующие несколько другим потокам, а именно — потокам, в действительности имеющим место в этих звеньях, т. е. учитывающих и уравнительную мощность. Однако, т. к. в формуле для определения дополнительной уравнительной мощности члены, содержащие определяемую сейчас нами мощность, имеют второстепенное значение и мало влияют на конечный результат расчетов дополнительной уравнительной

мощности, то можно воспользоваться известными нам потерями в звеньях III и II (табл. 16).

Итак, часть мощности 3-го узла, идущая непосредственно на покрытие соответ. частей нагрузок в узлах „4“ и „2“

$$\begin{aligned}\bar{W}'_{3(4,2)} &= \bar{W}_{3(4)} + \bar{W}_{3(2)} + \Delta \bar{W}_{II} + \Delta \bar{W}_{III} = \\ &= 51,5 - j19,4 + 27,3 - j12 + 5,17 - j8,41 + 8,92 - j12,27 = \\ &= 92,89 - j52,08 \text{ мва.}\end{aligned}$$

Остаток мощности узла „3“ будет перетекать от узла „3“ к узлу „1“. Этот остаток равен

$$\begin{aligned}\bar{W}_{ур} &= \bar{W}_3 - \bar{W}'_{3(4,3)} = \\ &= -(100 - j61,37) - (92,89 - j52,08) = -(7,11 - j9,29).\end{aligned}$$

Для снижения напряжения в узле „3“ на „8“ кВ необходимо пропустить по сети между узлами „3“ и „1“ дополнительную уравнивающую мощность, величина которой определится (с некоторой погрешностью) из выражения:

$$-\Delta E = \frac{P_{ур} \cdot R + Q_{ур} \cdot X}{E_3} - \frac{P_{ур} \cdot R + Q_{ур} \cdot X}{E'_3} - \frac{Q'_{ур} \cdot X}{E'_3}.$$

Полное сопротивление сети между узлами „3“ и „1“

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= \frac{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) \cdot (\bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV})}{(\bar{Z}_I + \bar{Z}_{II}) + (\bar{Z}_{III} + \bar{Z}_{IV})} = \\ &= \frac{75,2 \angle 57^\circ \cdot 107,3 \angle 59^\circ}{182,3 \angle 58^\circ 6'} = 44,3 \angle 57^\circ 54' = 23,5 + j37,6 \Omega.\end{aligned}$$

Следовательно:

$$\begin{aligned}-\Delta E &= -8 = \frac{(-7,11) \cdot 23,5 + (-9,29) \cdot 37,6}{120,08} - \\ &- \frac{(-7,11) \cdot 23,5 + (-9,29) \cdot 37,6}{112,0} - \frac{Q'_{ур} \cdot 37,6}{112} = \\ &= -4,23 - (-4,53) - 0,335 Q'_{ур},\end{aligned}$$

откуда

$$Q'_{ур} = + \frac{8 - 0,3}{0,335} = +23 \text{ мва.}$$

Знак + указывает на то, что реактивную мощность нужно транспортировать от узла „1“ к узлу „3“, т. е., иначе говоря, мощность станции 3-го узла, в части ее реактивной составляющей, не будет использована на 23 мва; эти 23 мва покроет станция 1-го узла.

Разделим, далее, дополнительную реактивную мощность соответственно двум параллельным ветвям II-I и III-IV

$$\begin{aligned}\bar{Q}'_{ур(II-I)} &= \bar{Q}'_{ур} \frac{\bar{Z}}{\bar{Z}_{II} + \bar{Z}} = \\ &= +23 \angle -90^\circ \frac{44,3 \angle 57^\circ 54'}{75,2 \angle 57^\circ} = \\ &= 13,55 \angle -89^\circ 6' = 0,20 - j13,55 \text{ мва}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Q}'_{vp(III-IV)} &= \bar{Q}'_{yp} \frac{\bar{Z}}{\bar{Z}_{IV} + \bar{Z}_{III}} = \\ &= 23 \angle -90^\circ \frac{44,3 \angle 57^\circ 54'}{107,3 \angle 59^\circ} = 9,5 \angle -91^\circ 6' = \\ &= -0,19 - j9,5 \text{ мва}\end{aligned}$$

Новые потоки мощностей в звеньях сети, с учетом дополнительной уравнительной мощности, представлены в табл. 22:

Таблица № 22

Звено	Первоначальная мощность	Дополнительная уравнит. мощность	Мощность звена с учетом доп. ур. мощ.
I (нач.) . . .	50,41 — j 15,47	0,20 — j 13,55	50,61 — j 29,02
II (кон.) . . .	31,62 — j 17,90	0,20 — j 13,55	31,42 — j 4,35
III (кон.) . . .	54,29 — j 23,79	+ 0,19 — j 9,5	54,48 — j 14,29
IV (нач.) . . .	26,76 — j 13,06	— 0,19 — j 9,5	26,57 — j 22,56

Напряжения в узлах найдем, имея в виду заданное напряжение в 1-м узле.

$$E_1 = 114,96 \text{ кВ},$$

$$\begin{aligned}E_2 &= \sqrt{\left(114,96 - \frac{50,61 \cdot 15,5 + 29,02 \cdot 21,2}{114,96}\right)^2 + \left(\frac{50,61 \cdot 21,2 - 29,02 \cdot 15,5}{114,96}\right)^2} \\ &= \sqrt{102,70^2 + 5,4^2} = 102,8 \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_3 &= \sqrt{\left(102,8 + \frac{31,42 \cdot 25,5 + 4,35 \cdot 41,7}{102,8}\right)^2 + \left(\frac{31,42 \cdot 41,7 - 4,35 \cdot 25,5}{102,8}\right)^2} \\ &= \sqrt{112,35^2 + 12^2} = 112,95 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

По заданию нужно было бы получить 112,08. Неточность результата вычисления объясняется многими допущениями, сделанными в процессе определения как дополнительной реактивной мощности, так и общих потоков мощностей в звеньях. Неучтено, напр., изменение потерь в звеньях в связи с изменениями мощностей в звеньях за счет дополнительной уравнительной мощности.

Х.

Итак, нами разобраны, как возможные или известные в печати, следующие методы расчета напряжений и потокораспределения мощностей в сетях сложных систем:

- метод узловых уравнений,
- метод трансформации,
- метод средних мощностей (контурных уравнений),
- метод уравнительных мощностей.

Каждый из этих методов расчета обладает и своими достоинствами, и своими недостатками. С течением времени практические работники отдадут свое наибольшее предпочтение одному из этих методов и тем самым докажут его наибольшую жизненность. С другой стороны, сами методы могут с течением времени претерпевать изменения в сторону их совершен-