



## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НЕОДНОРОДНОГО КОНТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Солдатов В.А., д.т.н., заведующий кафедрой информационных технологий в электроэнергетике.  
Мелешко М.И., старший преподаватель кафедры теоретических основ электротехники.  
Костромская государственная сельскохозяйственная академия.

### Введение

Исследование эффективности применения управляющих средств в электрических сетях с целью снижения потерь электроэнергии - является актуальной задачей [1-6]. При этом, в общем случае, в ветвь (i-j) сети можно включить фазорегулирующий трансформатор (с углом  $\Theta_{ij}$ ), трансформатор с регулируемым коэффициентом трансформации ( $K_{ij}$ ) и продольное сопротивление (индуктивное или емкостное -  $X_{ij}$ ), а в узел (i) сети можно включить поперечную проводимость (индуктивную или емкостную -  $V_i$ ). В основном [1-6], предлагались различные методики определения законов управления параметрами управляющих средств - при уже известном их месте включения. В [7-8] при определении места включения управляющего устройства было предложено использовать в качестве критериев производные от потерь активной мощности ( $\Delta P$ ) по регулируемому параметру:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta_{ij}}, \frac{\partial \Delta P}{\partial k_{ij}}, \frac{\partial \Delta P}{\partial X_{ij}}.$$

В начале выбирались ветви с максимальными производными. Была разработана соответствующая программа для ЭВМ. Однако, на практике при сложной сети, эта программа работала не устойчиво, т.е. не всегда наилучшие ветви имели наибольшие производные. Таким образом, только по производной нельзя судить об эффективности ветви. Поэтому в дальнейшем, были применены так называемые относительные коэффициенты чувствительности, равные отношению относительных производных к относительному параметру:

$$\frac{\partial \Delta P / \Delta P}{\partial \theta_{ij} / \theta_{ij}}, \frac{\partial \Delta P / \Delta P}{\partial k_{ij} / k_{ij}}, \frac{\partial \Delta P / \Delta P}{\partial X_{ij} / X_{ij}}, \frac{\partial \Delta P / \Delta P}{\partial V_i / V_i}.$$

Была разработана программа для ЭВМ, которая показала эффективность такого подхода. Иногда целесообразно привести всю электрическую сеть к эквивалентному контуру [9]. Исследования показали, что в зависимости от ситуации - все управляющие средства конкурентно способны. Для подтверждения этого были проделаны расчеты и

исследования конкретного неоднородного контура в электрической сети «Костромаэнерго». Этот контур состоит из двух участков, содержащих линии и трансформаторы класса 110 и 220 кВ, а также промежуточные нагрузки.

### 1. Исследование контура в нормальном режиме.

В представленном контуре Костромаэнерго (рисунок 1) передача мощности от источника (узел 73) к основному потребителю (узел 130) осуществляется двумя путями: участок "КГРЭС – Кострома-2 – Мотордеталь" (73-74-130) и участок "КГРЭС – Мотордеталь" (73-273-531-130).

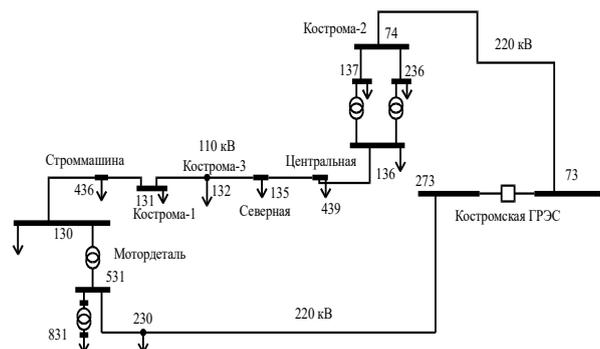


Рисунок 3.1 Контур "КГРЭС-Мотордеталь" сетей Костромаэнерго

Первый участок представляет собой в основном электрические сети с классом напряжения 110 кВ, только ветвь 73-74 является линией напряжением 220 кВ. Совместная параллельная работа двух участков приводит к распределению потоков передаваемых активной и реактивной мощностей соответственно сопротивлению обоих участков. Активное сопротивление первого участка почти в 2,5 раза больше активного сопротивления второго участка, поэтому чрезмерная загрузка первого участка приводит к увеличению потерь активной мощности и к недогрузке второго участка.

При включении всех промежуточных нагрузок (узлы 436, 131, 132, 135, 439, 136), как видно из таблицы 1, первый участок контура будет загружен

больше второго независимо от мощности в узле 130, т.к. почти все нагрузки находятся на первом участке контура. Так при  $P_{130}=0$  на участок 73-74-130 приходится 66,6% передаваемой активной мощности, при  $P_{130}=150$  МВт – 56,4%, а при  $P_{130}=300$  МВт процент снижается до 54%. При увеличении мощности  $P_{130}$  со 100 до 300 МВт потери возросли в 5,2 раза. Это связано с тем, что значительная часть нагрузки не меняется.

Таблица 1 – Распределение мощности по ветвям контура в обычном режиме.

$P_{130}$ МВт	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт
0	96,4	49,4	48,3	22,5	2,2
50	119,8	50,8	75,5	30,7	2,9
100	144,0	54,3	102,9	41,6	4,6
150	169,2	60,4	130,6	55,4	7,4
200	195,4	69,4	158,4	72,6	11,4
250	222,7	82,2	186,4	94,3	16,9
300	251,8	99,7	215,0	121,3	24,4

## 2. Исследование контура при включении фазорегулирующего трансформатора (ФРТ) в ветви.

Чтобы исследовать эффективность применения ФРТ были рассчитаны режимы контура с фазорегулятором в ветвях 73-74 и 273-230. Регулирование распределения потоков мощности в контуре осуществляется путем изменения угла между напряжением на входе и на выходе ФРТ. Результаты расчета оптимальных углов ( $\Theta_{\text{опт}}$ ) между входным и выходным напряжениями фазорегулирующего трансформатора для различных нагрузок в узле 130, при которых потери активной мощности минимальны, приведены в таблице 2.

При отсутствии потребления энергии в узле 130 оптимальный угол ФРТ не равен нулю и имеются значительные потери активной мощности в контуре. Увеличение мощности  $P_{130}$  на каждые 50 МВт приводит к увеличению оптимального угла поворота фазорегулятора на 3 градуса в положительную сторону.

В таблице 2 приведены результаты расчетов распределения мощности в оптимальном режиме работы, а также потерь активной мощности и снижения этих потерь по отношению к обычному режиму.

Участок 73-74-130 загружен намного больше, т.к. основные нагрузки находятся на нем. При

отсутствии нагрузки в узле 130, на него приходится 72,2% от всей передаваемой активной мощности

Таблица 2. Распределение мощности по ветвям контура при оптимальных режимах с ФРТ в ветви 73-74

$P_{130}$ МВт	$\Theta_{\text{опт}}$ град.	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Снижение потерь %
0	-3	104,4	45,2	40,3	28,5	2,2	-0,6
50	0	111,6	48,4	83,7	35,0	3,0	-0,8
100	3	119,8	53,3	126,9	46,5	4,3	8,4
150	6	129,0	59,8	169,6	63,3	6,2	18,9
200	9	139,8	68,6	211,4	86,1	8,9	27,3
250	12	152,8	80,0	252,3	115,8	12,7	32,9
300	15	168,7	95,1	291,4	154,4	17,9	36,0

При  $P_{130}=150$  МВт этот показатель снижается до 43,2%, а при  $P_{130}=300$  МВт – до 36,7%. При невысоких нагрузках наблюдается очень маленькое увеличение потерь по сравнению с нормальным режимом, но дальнейшее увеличение нагрузки ведет к снижению относительных потерь. Видно, что при увеличении передаваемой мощности увеличивается разница между потерями в этих двух режимах.

Исследование включения ФРТ в ветвь 273-230 показало, что как и в предыдущем примере, при включении фазорегулятора в ветвь 273-230 оптимальный угол между входным и выходным напряжениями отличен от нуля даже при отсутствии нагрузки в узле 130 (см. таблицу 3).

Таблица 3. Распределение мощности по ветвям контура при оптимальных режимах с ФРТ в ветви 273-230

$P_{130}$ МВт	$\Theta_{\text{опт}}$ град.	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Снижение потерь %
0	1	104,6	50,1	40,0	23,9	2,2	2,2
50	-2	115,1	53,6	80,2	31,0	2,9	1,1
100	-6	121,9	59,8	124,7	43,1	4,2	9,5
150	-9	135,1	67,6	163,6	60,5	6,2	18,6
200	-13	145,7	78,8	205,8	84,7	9,1	25,3
250	-16	163,7	92,9	241,7	114,9	13,1	28,5
300	-20	181,8	112,9	279,0	156,0	19,0	28,3

Угол, при котором наблюдаются минимальные потери, изменяется на 3-4 градуса в отрицательную сторону при увеличении нагрузки  $P_{130}$  на каждые 50 МВт. Изменение угла поворота фазорегулятора на 5 градусов в какую-нибудь сторону ведет к увеличению потерь на 0,4-0,5 МВт.

Распределение активной и реактивной мощностей при включении фазорегулятора в ветвь 273-230 происходит несколько иначе, по сравнению с предыдущим случаем. Значение всех этих показателей приведено в таблице 3. Так при мощности  $P_{130}=0$  МВт по первой ветви протекает 72,3%, а остальное – по второй. При  $P_{130}=150$  МВт это значение снижается до 45,2%, а при  $P_{130}=300$  МВт – до 39,4%. Максимальное относительное снижение потерь достигается при передаваемой мощности  $P_{130}=250$  МВт, дальнейшее увеличение которой приводит к снижению этого показателя.

Видно, что при увеличении мощности в узле 130 увеличивается экономия энергии за счет увеличения разницы между потерями в обычном режиме работы и потерями в оптимальном.

Таким образом, проведенные исследования показали, что установка ФРТ приводит к значительному снижению потерь и эта эффективность увеличивается с ростом нагрузки. Установка ФРТ в первый участок контура дает большее снижение потерь, чем при установке ФРТ во второй участок. При этом, при максимальной нагрузке потери в первом случае снижаются на 36%, а во втором случае на 28%, что очень существенно.

### 3. Исследование контура при включении трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации в ветви.

Для исследования целесообразности применения трансформатора с изменяющимся коэффициентом трансформации были рассчитаны режимы контура с трансформатором в ветвях 73-74 и 273-230.

Регулирование распределения потоков мощности в контуре осуществляется путем изменения коэффициента трансформации в ветви. Результаты расчета коэффициентов трансформации ( $k_{опт}$ ), при которых потери активной мощности минимальны, приведены в таблице 4.

При отсутствии потребления энергии в узле 130 оптимальный коэффициент трансформации отличен от единицы и имеются значительные потери. Увеличение мощности в узле 130 вводит к уменьшению оптимального коэффициента трансформации.

В таблице 4 приведены результаты расчетов распределения мощности в оптимальном режиме работы, потерь активной мощности и снижения потерь по отношению к обычному режиму. Участок 73-74-130 загружен намного больше, т.к. основные

нагрузки находятся на нем. При отсутствии нагрузки в узле 130 на него приходится 65,1% от всей передаваемой активной мощности. При  $P_{130}=150$  МВт этот показатель снижается до 55,1%, а при  $P_{130}=300$  МВт равен 55,3%. При невысоких нагрузках наблюдается очень маленькое увеличение потерь по сравнению с нормальным режимом, но дальнейшее увеличение нагрузки ведет к снижению относительных потерь.

Исследование включения трансформатора в ветвь 273-230 показало, что при включении его в ветвь 273-230 оптимальный коэффициент трансформации при отсутствии нагрузки в узле 130 равен единице (см. таблицу 5).

Включение нагрузки в узле 130 приводит к резкому снижению оптимального коэффициента трансформации. Дополнительное увеличение мощности приводит к все большему снижению оптимального коэффициента трансформации.

Таблица 4. Распределение мощности по ветвям контура при оптимальных режимах с трансформатором в ветви 73-74.

$P_{130}$ МВт	$k_{опт}$	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Сниже ние потерь %
0	0,95	94,2	62,7	50,5	97,8	2,26	-0,6
50	0,95	116,6	63,6	78,6	17,7	2,83	5,1
100	0,95	139,6	66,3	106,9	28,5	4,26	9,3
150	0,94	164,8	74,4	134,3	38,3	6,65	11,6
200	0,92	192,3	87,9	160,3	46,6	10,10	13,1
250	0,9	221,0	107,3	185,9	57,7	14,74	14,9
300	0,86	254,9	130,7	208,2	60,5	20,71	17,8

При увеличении нагрузки  $P_{130}$  оптимальный коэффициент трансформации уменьшается. Также увеличение нагрузки приводит к тому, что при отклонении коэффициента трансформации от оптимального значения потери активной мощности в контуре все больше отличаются от оптимальных. Следовательно, при регулировании коэффициента трансформации при высоких нагрузках следует соблюдать высокую точность.

Распределение активной и реактивной мощностей при включении трансформатора в ветвь 273-230 происходит несколько иначе, по сравнению с предыдущим случаем. Значение всех этих показателей приведено в таблице 5.

Так при мощности  $P_{130}=0$  МВт по первой ветви протекает 68,9%, а остальное – по второй. При  $P_{130}=150$  МВт это значение снижается до 63,7%, а при  $P_{130}=300$  МВт – до 49,3%. Максимальное относительное снижение потерь достигается при максимальной передаваемой мощности.

При невысоких нагрузках в узле 130 (до 200 МВт) применение трансформатора ведет к увеличению потерь мощности в контуре.

Таблица 5. Распределение мощности по ветвям котура при оптимальных режимах с трансформатором в ветви 273-230.

$P_{130}$ МВт	$X_{\text{опт}}$	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Сниже ние потерь %
0	1	99,7	50,7	45,0	23,2	2,22	1,3
50	0,99	124,0	49,3	71,4	34,8	3,04	-2,3
100	0,96	146,7	43,4	100,5	56	4,86	-4,2
150	0,93	169,7	39,3	130,5	81,3	7,69	-3,5
200	0,89	191,1	32,6	162,8	115,5	11,50	-0,6
250	0,85	212,2	27,0	196,3	155,9	16,22	4,4
300	0,79	228,8	11,0	235,1	215,3	21,85	11,6

При увеличении  $P_{130}$  экономия потерь начинает возрастать за счет увеличения разницы между потерями в обычном режиме работы и потерями в оптимальном.

Таким образом, проведенные исследования показали, что установка трансформатора не приводит к существенному снижению потерь. Установка трансформатора в первый участок контура дает большее снижение потерь, чем при установке его во второй участок. При этом, при максимальной нагрузке потери в первом случае снижаются на 17,8%, а во втором случае на 11,6%.

#### 4. Исследование контура при включении реактивного сопротивления в ветви.

Для исследования целесообразности применения реактивного сопротивления были рассчитаны режимы контура с различными реактивными сопротивлениями в ветвях 73-74 и 273-230. Регулирование распределения потоков мощности в контуре осуществляется путем изменения мнимой части сопротивления ветви. Результаты расчета реактивного сопротивления ( $X_{\text{опт}}$ ), при котором потери активной мощности минимальны, приведены в таблице 6.

При отсутствии потребления энергии в узле 130 оптимальное реактивное сопротивление отлично от нуля, при этом имеются значительные потери активной мощности в контуре. Увеличение мощности в узле 130 ведет к необходимости увеличения индуктивного сопротивления участка 73-74-130. При этом участок все больше "запирается".

Увеличение или уменьшение сопротивления относительно оптимального на 50 Ом ведет к

увеличению потерь более чем на 2 МВт при  $P_{130}=0$ , а при максимальной нагрузке – более чем на 5 МВт.

В таблице 6 приведены результаты расчетов распределения мощности в оптимальном режиме работы, потерь активной мощности и снижения потерь по отношению к обычному режиму.

Таблица 6. Распределение мощности по ветвям котура при оптимальных режимах с сопротивлением в ветви 73-74.

$P_{130}$ МВт	$X_{\text{опт}}$ Ом	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Сниже ние потерь %
0	-10	103,0	51,9	40,5	20,9	2,15	4,6
50	0	119,9	50,8	75,5	31,8	2,97	0,0
100	20	125,7	49,2	121,1	50,6	4,44	4,9
150	30	138,6	51,6	160,4	72,2	6,65	11,7
200	40	150,6	55,6	201,7	102,4	9,84	16,1
250	40	171,4	65,1	235,2	134,9	14,41	17,5
300	40	193,6	79,6	169,7	180,5	21,25	14,8

Участок 73-74-130 загружен намного больше, т.к. основные нагрузки находятся на нем. При отсутствии нагрузки в узле 130 на него приходится 71,7% от всей передаваемой активной мощности. При  $P_{130}=150$  МВт этот показатель снижается до 46,3%, а при  $P_{130}=300$  МВт равен 53,2%. При невысоких нагрузках наблюдается очень маленькое снижение потерь по сравнению с нормальным режимом, но увеличение нагрузки  $P_{130}$  свыше 50 МВт ведет к увеличению процента снижения потерь, максимум которого наблюдается при  $P_{130}=250$  МВт. При увеличении передаваемой мощности увеличивается разница между потерями в этих двух режимах.

Исследование изменения реактивной составляющей сопротивления ветви 273-230 показало, что сопротивление при отсутствии нагрузки в узле 130 носит индуктивный характер, но затем идет его резкое снижение (таблица 6) и оно становится емкостным. Дополнительное увеличение мощности приводит к все большему увеличению емкостного сопротивления, при котором наблюдается минимум потерь мощности в рассматриваемом контуре.

Распределение активной и реактивной мощностей при включении реактивного сопротивления в ветвь 273-230 происходит несколько иначе, по сравнению с предыдущим случаем. Значение всех этих показателей приведено в таблице 7.

Так при мощности  $P_{130}=0$  МВт по первой ветви протекает 72,6%, а остальное – по второй. При  $P_{130}=150$  МВт это значение снижается до 39,4%, а при  $P_{130}=300$  МВт – до 28,5%. Максимальное

относительное снижение потерь достигается при максимальной передаваемой мощности.

Таблица 7. Распределение мощности по ветвям котура при оптимальных режимах с сопротивлением в ветви 273-230.

$P_{130}$ МВт	$X_{\text{опт}}$ Ом	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Сниже ние потерь %
0	30	105,1	53,0	39,5	21,9	2,21	1,8
50	-10	113,9	49,0	81,4	32,0	2,93	1,6
100	-30	116,1	47,1	130,5	39,5	4,17	11,7
150	-40	117,5	47,2	180,8	45,3	5,97	24,4
200	-40	131,4	49,3	219,1	56,1	8,24	38,7
250	-40	145,6	52,2	257,8	69,0	11,17	51,5
300	-50	130,1	52,6	327	65,0	14,73	65,6

При невысоких нагрузках в узле 130 (до 50-70 МВт), установка дополнительного реактивного сопротивления не ведет к заметному уменьшению потерь мощности в контуре. Но дальнейшее увеличение передаваемой мощности значительно увеличивает разницу между потерями в обычном и оптимальном режимах.

Расчеты показали, что установка реактивного сопротивления приводит к существенному снижению потерь активной мощности в контуре. Стоит также заметить, что в отличие от первых двух случаев (ФРТ и трансформатор), максимальное снижение потерь наблюдается при установке регулятора (конденсатора) на втором участке контура (73-273-531-130). При максимальной нагрузке потери снижаются на 65,6%.

### 5. Исследование контура при включении поперечной реактивной проводимости в узлы.

Чтобы исследовать эффективность применения поперечной реактивной проводимости (емкости) были рассчитаны режимы контура с различной реактивной проводимостью узлов 130 (Мотордеталь) и 74 (Кострома – 2). Регулирование распределения потоков мощности в контуре осуществляется путем изменения мнимой части проводимости узла. Результаты расчета оптимальных проводимостей ( $V_{\text{опт}}$ ) узла 130 для различной нагрузки в нем, при которых потери активной мощности в контуре минимальны, приведены в таблице 8.

При отсутствии потребления энергии в узле 130 оптимальная реактивная проводимость отлична

от нуля. Также имеются значительные потери активной мощности в контуре. Увеличение мощности в узле 130 ведет к увеличению проводимости узла 130. Т.е., чем больше нагрузка – тем больше ( $V_{\text{опт}}$ ).

При отклонении проводимости от ( $V_{\text{опт}}$ ) потери изменяются слабо. Так изменение проводимости в диапазоне  $V_{\text{опт}} \pm 700$  См приводит к увеличению потерь активной мощности всего на 0,06 – 0,14 МВт.

В таблице 8 приведены результаты расчетов распределения мощности в оптимальном режиме работы, потерь активной мощности и снижения потерь по отношению к обычному режиму.

Таблица 8. Распределение мощности по ветвям котура при оптимальных режимах с проводимостью в узле 130.

$P_{130}$ МВт	$V_{\text{опт}}$ См	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{73-273}$ МВт	$Q_{73-273}$ МВар	$\Delta P$ МВт	Сниже ние потерь %
0	1300	88,6	40,1	56,2	17,6	2,39	-5,9
50	1600	110,2	39,8	85,1	24,2	2,94	1
100	2300	132,2	39,2	114,4	30,9	4,35	6,5
150	3500	154,6	38	144,5	37,3	6,68	9,9
200	5200	177,2	36,3	175,1	43,7	9,98	12,6
250	7400	200,1	34,0	206,3	49,8	14,29	15,5
300	10200	223,7	30,4	238,6	55,0	19,76	19

Участок 73-74-130 загружен больше, т.к. основные нагрузки находятся на нем. При отсутствии нагрузки в узле 130 на него приходится 61,2% от всей передаваемой активной мощности. При  $P_{130}=150$  МВт этот показатель снижается до 51,8%, а при  $P_{130}=300$  МВт равен 48,4%. При невысоких нагрузках наблюдается малое снижение потерь по сравнению с нормальным режимом, но увеличение нагрузки  $P_{130}$  свыше 100 МВт ведет к увеличению процента снижения потерь, максимум которого наблюдается при  $P_{130}=300$  МВт.

При увеличении передаваемой мощности увеличивается разница между потерями в этих двух режимах.

Исследование изменения реактивной проводимости в узле 74 показало, что изменение ( $V_{\text{опт}}$ ) происходит меньшими темпами, чем в предыдущем случае (см. таблицу 9). Как и в предыдущем примере при отсутствии нагрузки в узле оптимальная проводимость отлична от нуля.

Распределение активной и реактивной мощностей при включении реактивной проводимости в узле 74 происходит иначе, по сравнению с предыдущим случаем. Значение всех этих показателей приведено в таблице 9. Так при увеличении мощности узла 130, увеличивается в отрицательную сторону значение реактивной мощности, протекающей по первому участку контура. При  $P_{130}=0$  МВт по первой ветви протекает минус 8,356 МВар, а при  $P_{130}=300$  Мвар это

значение составляет минус 43,716 МВар. Максимальное относительное снижение потерь достигается при максимальной передаваемой мощности.

При невысоких нагрузках в узле 130 (70-100 МВт) установка реактивной проводимости ведет к заметному уменьшению потерь мощности в контуре. Но дальнейшее увеличение передаваемой мощности увеличивает разницу между потерями в обычном и оптимальном режимах.

Расчеты показали, что установка реактивной проводимости приводит к существенному снижению потерь активной мощности в контуре. Стоит также заметить, что при установке проводимости в узле 74 заметное снижение потерь активной мощности происходит уже при малых мощностях узла 130. При максимальной нагрузке, потери в первом случае снижаются на 19%, а во втором – на 18,8%.

Таблица 9. Распределение мощности по ветвям контура при оптимальных режимах с проводимостью в узле 74.

$P_{130}$ МВт	Воит См	$P_{73-74}$ МВт	$Q_{73-74}$ МВар	$P_{273-230}$ МВт	$Q_{273-230}$ МВар	ΔP МВт	Снижение потерь %
0	1400	90,5	-8,3	53,9	13,2	1,9	14,7
50	1500	112,8	-11,2	82,0	20,4	2,4	17,9
100	1600	135,7	-12,2	110,3	30,4	3,8	18,3
150	1900	160,0	-19,5	138,5	41,3	6,0	17,9
200	2200	185,1	-24,4	166,7	55,5	9,4	17,7
250	2600	211,4	-31,0	194,7	72,2	13,8	17,9
300	3200	239,8	-43,7	222,5	90,5	19,8	18,8

## 6. Сравнение эффективности применения рассмотренных управляемых устройств

Проанализируем приведенные в таблицах 1-9 значения потерь активной мощности в контуре для различных нагрузок в узле 130 в обычном режиме и для оптимальных режимов работы регулирующих устройств: ФРТ, трансформатор, сопротивление - в ветвях 73-74 или 273-230, а также поперечная проводимость в узлах - 130 или 74.

Наибольшее снижение потерь наблюдается при установке фазорегулятора. Эффект от установки продольного сопротивления, трансформатора с переменным коэффициентом трансформации и проводимости в узле 130 практически одинаков на всем интервале изменения передаваемой мощности. Однако, при максимальной нагрузке процент снижения потерь активной мощности при оптимальных коэффициентах трансформации, оптимальных проводимостях и оптимальных сопротивлениях в контуре примерно в два раза меньше, чем при оптимальном угле фазорегулятора.

Установка фазорегулирующего трансформатора и трансформатора с переменным коэффициентом трансформации в ветвь 273-230

приводит к увеличению потерь мощности по сравнению с предыдущим случаем. К примеру, эффект от оптимального коэффициента трансформации наблюдается только при мощности выше 200 МВт, а до этого потери даже больше, чем в обычном режиме. Напротив, установка продольного сопротивления в ветвь 273-230 приводит к значительному снижению потерь мощности (по сравнению с предыдущим случаем процент снижения потерь при максимальной нагрузке вырос более чем в 4 раза). При малых значениях передаваемой мощности (до 150 МВт) наилучший эффект дает включение проводимости в узел 74.

Наибольшее снижение потерь наблюдается при установке емкости в ветвь 273-230. При этом преимущество этого способа регулирования потоков мощности в контуре становится заметным уже при мощности в узле 130 свыше 150 МВт, хотя до этого значения - потери немного больше, чем в оптимальном режиме работы с проводимостью в узле 74. Следовательно, при невысокой передаваемой мощности (до 150 МВт) в контуре целесообразнее использовать проводимость в узле 74, а если контур загружается максимально, то установка реактивного сопротивления (емкости) в ветви 273-230 дает наибольший эффект.

## 7. Заключение

В работе получили развитие методика расчета режимов электрических сетей, содержащих управляющие устройства. Основные выводы и результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Доработана методика выбора мест установки и расчета оптимальных параметров регулирующих устройств, включаемых в ветви и узлы электрической сети.
2. На примере неоднородного контура сети "Костромаэнерго" рассчитаны оптимальные режимы для случаев применения четырех видов управляющих устройств: фазорегулирующего трансформатора (угол  $\Theta$ ), трансформатора с регулируемым модулем коэффициента трансформации ( $k$ ), регулируемого продольного сопротивления ( $X$ ), регулируемой проводимости узла ( $B$ ):
  - получены оптимальные законы регулирования параметров этих устройств при изменении нагрузки сети;
  - сделано сравнение указанных способов регулирования между собой;
  - показано, что по сравнению с исходным режимом при максимальной передаваемой мощности: применение ФРТ позволяет снизить потери на 36,0 %; применение трансформатора позволяет снизить потери на 17,8 %; применение сопротивления позволяет снизить

потери на 65,6 %; применение поперечной проводимости позволяет снизить потери на 19 %.

3. На конкретном примере показано, что в зависимости от параметров сети и различных нагрузках все управляющие средства могут быть конкурентно способными. При этом, если перераспределяется не только активная, но и реактивная мощность, то эффективными могут быть не только продольные, но и поперечные устройства. Данные исследования необходимо продолжить для изучения всех случаев неоднородностей, встречающихся в электрических сетях, которые как в данном случае позволяют сделать важные обобщения. При разработке программ по применению управляемых устройств необходимо рассматривать не какое-то одно устройство, а все возможные для данного случая.

### Литература.

1. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. – М.: Высшая школа, 1975, 221 с.
2. Крюков А. А., Либкин М. С., Сорокин В. М. Управляемая поперечная компенсация электропередачи переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1981, 182 с.
3. Анисимова И.Д., Веников В.А., Зарудский Г.К. Исследование влияния месторасположения и степени продольной емкостной компенсации на пропускную способность электропередачи 750 кВ /Дальние электропередачи 750 кВ, Ч.1, Воздушные линии: Энергия, 1974. с. 43-50.
4. Электрические системы./Под ред. В. А. Веникова. Режимы работы электрических систем и сетей. - М.: Высшая школа, 1975, 342 с.
5. Солдатов В.А., Постолатий В.М. Расчет и оптимизация параметров и режимов управляемых многопроводных линий. - Кишинев: Штиинца, 1990, 239 с.
6. Киорсак М., Солдатов В. А. и др. Гибкие линии электропередачи с продольной емкостной компенсацией и фазоповоротным трансформатором. – Кишинева, 1997, 211 с.
7. Солдатов В.А., Локтионов С.В. Методика расчета производных от потерь активной мощности по параметрам управляемых устройств в ветвях электрической сети. – журнал Аспирант и соискатель, №3, 2001, с.320

8. Солдатов В.А. Локтионов С.В. Методика выбора управляющих средств в ветвях электрической сети для снижения потерь активной мощности. – доклад на Всероссийской научно – технической конференции Энергосистема: управление, качество, безопасность.- Екатеринбург, 2001, с.37

9. Солдатов В.А., Мелешко М.И. Параметры эквивалентной одноконтурной схемы замещения электрической сети.- Материалы научно - практической конференции, Кострома, КГСХА, 2002, с.23

### Сведения об авторах.

**Солдатов В.А.** - закончил в 1976 году Кишиневский политехнический институт по специальности Электрические системы и сети. С 1976 года работал в Институте энергетики Академии наук Молдовы. Прошел путь от младшего научного сотрудника до главного научного сотрудника. В 1987 году защитил кандидатскую диссертацию в специализированном совете при Ленинградском политехническом институте. В 1993 году защитил докторскую диссертацию в специализированном совете при Институте электродинамики (г. Киев). С 1999 года работает заведующим кафедрой информационных технологий Костромской государственной с/х академии. Читает 7 дисциплин по специальности. Круг интересов связан с разработкой и исследованием применения управляющих устройств, расчетом сложных несимметричных режимов, расчетом потерь мощности и энергии в электрических сетях, а также с расчетом электрических полей линий в нормальных и аварийных режимах. Имеет более 100 опубликованных научных работ.

**Мелешко М.И.** - закончила в 1985 году Кишиневский политехнический институт по специальности Электрические системы и сети. С 1985 года работала в Институте энергетики Академии наук Молдовы в должности инженера и научного сотрудника. С 2000 года работает старшим преподавателем кафедры теоретических основ электротехники Костромской государственной с/х академии. Читает 3 дисциплины по специальности. Круг интересов связан с разработкой и исследованием применения управляющих устройств и расчетом потерь мощности и энергии в электрических сетях. Имеет 15 опубликованных научных работ.