

**РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
В СЕТЯХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
(С ПРИМЕРАМИ И РЕШЕНИЯМИ)**



2014

Содержание

1. Выбор максимальной токовой защиты линий	3
1.1. Плавкие предохранители в сетях до 1000В	3
1.2. Автоматические выключатели и электромагнитные пускатели	5
1.3. Выбор сечения проводов и кабелей по условиям нагревания	6
2. Активные и индуктивные сопротивления линии	13
3. Расчет сети по допустимой потере напряжения без учета индуктивного сопротивления линии	15
4. Расчет сети по допустимой потере напряжения с учетом индуктивного сопротивления линии	19
5. Расчет сети при помощи вспомогательных таблиц удельных потерь	22
6. Выбор проводов по термической и динамической устойчивости к токам короткого замыкания	25
7. Кабельные линии напряжением 10 кВ	31
8. Воздушные линии напряжением 6 кВ	32
9. Кабельные линии напряжением 6 кВ	33
10. Воздушные линии напряжением до 1 кВ	34
11. Кабельные линии напряжением до 1 кВ	35
12. Линии для осветительных сетей	36
13. Смешанные силовые и осветительные сети	36
14. Расчет по наименьшей затрате металла	37
15. Расчет сети по условной постоянной плотности тока	39
16. Проверка условий срабатывания защитных аппаратов	40
17. Выбор проводов и кабелей по экономической плотности тока	48
18. Потери мощности и электроэнергии в электрических сетях	53
ЛИТЕРАТУРА	60

1. Выбор максимальной токовой защиты линий

1.1. Плавкие предохранители в электросетях до 1000 В

Различают плавкие предохранители с большой тепловой инерцией, т. е. способностью выдерживать значительные кратковременные перегрузки током, и безынерционные, обладающие малой тепловой инерцией и, следовательно, весьма ограниченной способностью к перегрузкам.

К первым относятся все установочные предохранители с винтовой резьбой и свинцовым токопроводящим мостиком, ко вторым - трубчатые предохранители с медным токопроводящим мостиком.

Номинальный ток плавкой вставки I_B для предохранителей с большой тепловой инерцией определяется только по величине длительного расчетного тока линии $I_{дл}$ из соотношения

$$I_B \geq I_{дл} \quad (4-5)$$

Номинальный ток плавкой вставки для безынерционных предохранителей должен удовлетворять двум условиям, одно из которых выражается соотношением (4-5), а другое - одной из приведенных ниже формул (4-6), (4-7) или (4-8).

При защите ответвления к одиночному электродвигателю с нечастыми пусками и длительностью пускового периода не более 2-2,5 сек. (электродвигатели металлообрабатывающих станков, вентиляторов, насосов и т. п.)

$$I_B \geq \frac{I_{п}}{2,5} \quad (4-6)$$

при защите ответвления к одиночному электродвигателю с частыми пусками (электродвигатели кранов) или большой длительностью пускового периода (двигатели центрифуг, дробилок и т. п.)

$$I_B \geq \frac{I_{п}}{1,6 \dots 2} \quad (4-7)$$

при защите магистрали, питающей силовую или смешанную нагрузку,

$$I_B \geq \frac{I_{кр}}{2,5} \quad (4-8)$$

В последних трех формулах:

$I_{п}$ - пусковой ток электродвигателя, а;

$I_{кр}$ - максимальный кратковременный ток линии:

$$I_{кр} = I_{п} + I_{дл} \quad (4-9)$$

где $I_{п}$ - пусковой ток электродвигателя или группы одновременно включаемых двигателей, при пуске которых кратковременный ток линии достигает наибольшей величины, а;

$I_{дл}$ - длительный расчетный ток линии до момента пуска электродвигателя (или группы двигателей), определяемый без учета рабочего тока пускаемого электродвигателя (или группы двигателей), а.

Для электродвигателей ответственных механизмов с целью особо надежной отстройки предохранителей от толчков тока допускается при выборе предохранителя пользоваться формулой (4-7), принимая знаменатель равным 1,6 независимо от условий пуска электродвигателя, если кратность тока к. з. удовлетворяет условиям, указанным в столбце 3, [табл. 7-8](#).

Номинальный ток плавкой вставки для защиты ответвления к сварочному аппарату

$$I_B \geq 1,2 I_{нсв} \sqrt{ПВ} \quad (4-10)$$

выбирается из соотношения

где $I_{нсв}$ - номинальный ток сварочного аппарата при номинальной продолжительности включения, а; ПВ - номинальная продолжительность включения аппарата, выраженная в долях единицы.

Номинальный ток плавкой вставки для защиты ответвления к сварочному аппарату можно принимать равным длительно допустимому току на прокладываемый для питания сварочного аппарата провод.

Технические данные плавких предохранителей приведены в [таблицах](#).

Избирательность защиты плавкими предохранителями магистральной линии с ответвлениями достигается последовательным увеличением величин плавких вставок на отдельных участках линии по мере приближения к пункту питания.

В табл. 4-37 приведены соотношения плавких вставок предохранителей ПН2 на большие и меньшие величины номинального тока для сетей особо ответственного назначения в зависимости от отношения тока короткого замыкания I_K к номинальному току плавкой вставки с меньшей величиной $I_{в.м}$, показывающие, какую величину номинального тока плавкой вставки $I_{в.б}$ следует выбрать, чтобы в любых неблагоприятных условиях обеспечить необходимую избирательность.

Так как приведенные значения выведены для обеспечения избирательности при наименее благоприятных условиях, в обычной практике достаточная надежность получается, если исходить из средних отступлений от типовых характеристик. Необходимые для этих случаев соотношения приведены в табл. 4-38.

Таблица 4-37 Условия избирательности плавких предохранителей ПН2 для сетей особо ответственного назначения

$I_K / I_{в.м}$	10	20	50	100	150 и более
Плавкая вставка с номинальным током $I_{в.м}$ меньшей величины, а	Плавкая вставка с номинальным током $I_{в.б}$ большей величины, а				
30	50	60	120	150	200
40	60	80	120	200	200
50	80	100	120	250	250
60	100	120	150	250	250
80	120	120	200	250	250
100	120	120-	250	250	250
120	150	150	300	300	300
150	200	200	300	300	300
200	250	250	400	400	400
250	300	300	600	>600	600
300	400	400	>600	-	-
400	600	500	-	-	-
		>600			

Таблица 4-38 Условия избирательности плавких предохранителей ПН2 для сетей нормального назначения

$I_K / I_{ВМ}$	10	20	50	100 и более
Плавкая вставка с номинальным током $I_{в.м}$ меньшей величины, а	Плавкая вставка с номинальным током $I_{в.б}$ большей величины, а			
30	40	50	80	120
40	50	60	100	120
50	60	80	120	120
60	80	100	120	120
80	100	120	120	150
100	120	120	150	150
120	150	150	250	250
150	200	200	250	250
200	250	250	300	300
250	300	300	400	>600
300	400	400	>600	-
400	500	>600	-	-

1.2. Автоматические выключатели и электромагнитные пускатели

Защита от перегрузки обеспечивается:

- 1)тепловыми расцепителями автоматических выключателей, действующими с выдержками времени, обратно зависимыми от величины тока перегрузки;
- 2)электромагнитными расцепителями с выдержкой времени, достаточной для снижения пускового тока электродвигателя до нормального;
- 3)тепловыми реле с нагревательными элементами магнитных пускателей;

Для защиты от к. з. применяются автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями мгновенного действия или с выдержкой времени, обеспечивающей избирательность действия.

Для обеспечения избирательности в системах электросетей, защищенных автоматическими выключателями, наименьшая выдержка времени устанавливается у электроприемника.

Одновременная защита линий от перегрузки и к. з. осуществляется применением комбинированных расцепителей, состоящих из двух элементов: одного - для защиты от перегрузки и другого - для защиты от к. з.

Номинальный ток защищающего от перегрузки теплового расцепителя и нагревательного элемента теплового реле магнитного пускателя $I_{н.т}$ выбирается только по длительному расчетному току линии:

$$I_{н.т} \geq I_{дл} \quad (4-11)$$

Номинальный ток электромагнитного или комбинированного расцепителя автоматических выключателей $I_{н.э}$ выбирается также по длительному расчетному току линии:

$$I_{н.э} \geq I_{дл} \quad (4-12)$$

а ток срабатывания (отсечки) электромагнитного или комбинированного расцепителя $I_{ср.э}$ проверяется по максимальному кратковременному току линии из соотношения

$$I_{ср.э} \geq 1,25 I_{кр} \quad (4-13)$$

(для ответвления к одиночному электродвигателю максимальный кратковременный ток линии равен пусковому току электродвигателя: $I_{кр} = I_p$).

Коэффициент 1,25 в формуле (4-13) учитывает неточность в определении максимального кратковременного тока линии и разброс характеристик электромагнитных расцепителей автоматов.

Ток срабатывания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависимой от тока характеристикой определяется по формуле

$$I_{ср.р} \leq 1,25 I_{дл} \quad (4-14)$$

1.3. Выбор сечений проводов и кабелей до 1000В по условию нагревания

Сечение проводов и кабелей напряжением до 1000 в по условию нагревания определяются из [таблиц](#) в зависимости от расчетного значения допустимой длительной нагрузки при нормальных условиях прокладки, определяемой как большая величина из двух соотношений:

по условию нагревания длительным расчетным током

$$I_{н.д} \geq \frac{I_{дл}}{K_p} \quad (4-15)$$

и по условию соответствия выбранному аппарату максимальной токовой защиты

$$I_{н.д} \geq \frac{K_z I_z}{K_p} \quad (4-16)$$

где K_p - поправочный коэффициент на условия прокладки проводов и кабелей;

K_z - кратность допустимого длительного тока для провода или кабеля по отношению к номинальному току или току срабатывания защитного аппарата;

I_z - номинальный ток или ток срабатывания защитного элемента, а.

При нормальных условиях прокладки $K_p = 1$ и соотношения (4-15) и (4-16) упрощаются:

$$I_{н.д} \geq I_{дл} \quad (4-17)$$

$$I_{н.д} \geq K_z I_z \quad (4-18)$$

Значения K_z и I_z определяются из табл. 4-50 в зависимости от характера сети, типа изоляции проводов и кабелей и условий их прокладки.

Если допустимая длительная токовая нагрузка, найденная по (4-16) или (4-18) не совпадает с данными таблиц допустимых нагрузок, разрешается применение проводника ближайшего меньшего сечения, но не меньшего, чем это требуется при определении допустимой нагрузки по (4-15) и (4-17). Сечения проводов и кабелей для ответвления к двигателю с короткозамкнутым ротором во всех случаях выбираются в соответствии с (4-15) или (4-17), в которых длительный расчетный ток линии равен: для невзрывоопасных помещений - номинальному току двигателя, а для взрывоопасных - 125% номинального тока двигателя напряжением до 1000в.

Во всех случаях должно быть обеспечено надежное отключение защитными аппаратами однофазного к. з., происшедшего в наиболее отдаленных точках сети. Это условие выполняется, если кратность тока однофазного к. з. в сетях глухо заземленной нейтралью не менее 3 по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя и номинальному току расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратно зависимую от тока характеристику.

Для сетей, защищаемых только от токов к. з., завышение токов плавких вставок предохранителей и уставок расцепителей автоматов по сравнению с величинами, регламентированными в табл. 4-50, допускается в необходимых случаях, например для

надежной отстройки от токов самозапуска двигателей, при условии, что кратность тока к. з. имеет значение не менее 5 по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя и не менее 1,5 по отношению к току срабатывания электромагнитного расцепителя автомата.

Сечения проводов и кабелей линии напряжением выше 1000 В по условиям нагревания определяются по длительным расчетным токам согласно (4-15) или (4-17).

Таблица 4-50 Минимальные кратности допустимых токовых нагрузок на провода и кабели по отношению к номинальным токам, токам трогания или токам уставки защитных аппаратов

Значение тока защитного аппарата I_z	Кратность допустимых длительных токов K_z			Сети, не требующие защиты от перегрузки
	Сети, для которых защита от перегрузки обязательна		Кабели с бумажной изоляцией	
	Проводники с резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией			
	Взрыво- и пожароопасные помещения, жилые, торговые помещения и т. п.	Невзрыво- и непожароопасные производственные помещения промышленных предприятий		
Номинальный ток плавкой вставки предохранителей	1,25	1,0	1,0	0,33
Ток уставки автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель	1,25	1,0	1,0	0,22
Номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой обратно зависимой от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки)	1,0	1,0	1,0	1,0
Ток трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависимой от тока характеристикой (при наличии на автоматическом выключателе отсечки кратность тока ее не ограничивается)	1,0	1,0	0,8	0,66

Пример 4-4

Магистральная линия силовой сети 380/220 В промышленного предприятия питает группу двигателей. Линия выполняется бронированным трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией и прокладывается в помещении с температурой окружающего воздуха +25° С. Длительный расчетный ток линии 100 А и кратковременный ток при самозапуске двигателей 500 А. Условия самозапуска электродвигателей легкие. Определить номинальный ток плавких вставок, защищающих линию предохранителей типа ПН-2, и выбрать сечение кабеля при следующих условиях:

1. Линия проходит в невзрывоопасном и непожароопасном производственном помещении и должна быть защищена от перегрузки.
2. Линия проходит в пожароопасном помещении и должна быть защищена от перегрузки.
3. Линия должна быть защищена только от к. з.

Решение.

Определяем величину номинального тока плавких вставок, защищающих линию предохранителей, по условию длительного тока из (4-5):

$$I_B \geq 100 \text{ А}$$

и по условию кратковременного тока из (4-8):

$$I_B \geq \frac{500}{2,5} = 200 \text{ а}$$

Решающим при выборе плавких вставок оказывается толчок тока при самозапуске электродвигателей. Останавливаемся на предохранителях типа ПН-2-250 с плавкими вставками на номинальный ток 200 а.

Для выбора сечения кабеля пользуемся упрощенными формулами (4-17) и (4-18), так как условия его прокладки нормальны (температура окружающего воздуха +25° С).

Допустимая нагрузка на кабель по условию нагревания длительным расчетным током определяется из (4-17):

$$I_{н.д} \geq 100 \text{ а}$$

и по условию соответствия сечения кабеля плавкой вставке предохранителя из (4-18), в котором значения коэффициента K_3 для каждого из рассматриваемых вариантов будут различными.

1. Для кабеля с резиновой изоляцией, защищаемого от перегрузки и проходящего в невзрывоопасном и непожароопасном помещении, из табл. 4-50

$$K_3 = 1,0$$

Допустимая длительная нагрузка на кабель определяется по (4-18):

$$I_{н.д} \geq 1 \cdot 200 = 200 \text{ а}$$

По [таблице](#) подбираем для трехжильного кабеля с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией при прокладке в воздухе сечение 120 мм², для которого допустимая нагрузка равна 200 а.

2. Для кабеля, проходящего в пожароопасном помещении и защищаемого от перегрузки, аналогично получим:

$$K_3 = 1,25$$

$$I_{н.д} \geq 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ а}$$

Сечение кабеля принимаем равным 150 мм²; допустимая длительная нагрузка для него равна 235 а. Пользуемся указанием о том, что при проверке соответствия сечений проводов и кабелей характеристике защитного аппарата допускается выбирать проводники ближайшего меньшего сечения, чем требуется по расчетному току.

3. Для кабеля, защищаемого только от к. з., получим:

$$K_3 = 0,33$$

$$I_{н.д} = 0,33 \cdot 200 = 66 \text{ а}$$

В данном случае сечение кабеля 50 мм² определяется условием нагревания длительным током (допустимая нагрузка 110 а).

Пример 4-5

На рис. 4-1 представлена схема участка силовой сети промышленного предприятия напряжением 380/220 в. От шин распределительного щита получает питание силовая сборка с автоматическими выключателями, к которой присоединяются шесть асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Электродвигатели 3 и 4 установлены во взрывоопасном помещении класса В 1а, остальные двигатели, распределительные пункты и пусковая аппаратура - в помещениях с нормальной средой. Технические данные двигателей указаны в табл. 4-51. Режим работы двигателей исключает возможность длительных перегрузок; условия их пуска нетяжелые, возможность самозапуска крупных двигателей исключена.

Один из двигателей 1 или 2 всегда находится в резерве; остальные двигатели могут работать одновременно.

Магистральная линия от распределительного щита до силового пункта защищена селективным автоматическим выключателем типа АВ-4С до 500 в и 400 а с максимальными расцепителями с обратно зависимой от тока характеристикой и отсечкой с выдержкой времени 0,6 сек. Линии от силового пункта к электродвигателям защищены установленными в шкафу типа ПР9262-137 автоматическими выключателями типа А3124 на 500 в и 100 а с комбинированными расцепителями.

Магистральная линия от распределительного щита до силового пункта выполнена трехжильным кабелем с бумажной изоляцией марки ААБГ, линии к электродвигателям - проводом с резиновой изоляцией АПРТО и (для взрывоопасного помещения) ПРТО в стальных трубах. Вся проводка проходит в помещениях с температурой воздуха +25° С. Требуется определить номинальные токи расцепителей автоматических выключателей и выбрать сечения проводов и кабеля из условия нагревания и соответствия токам расцепителей автоматических выключателей.

Рис. 4-1. Схема сети. 1 - шины 380/220 в распределительного щита; 2 - автоматический выключатель типа АВ-4С; 3 - шины распределительного силового пункта серии ПР-9000; 4 - автоматический выключатель типа А3124; 5 - кнопочный пускатель типа ПНВ-34; 6 - магнитный пускатель типа ПА; 7 - взрывоопасное помещение.

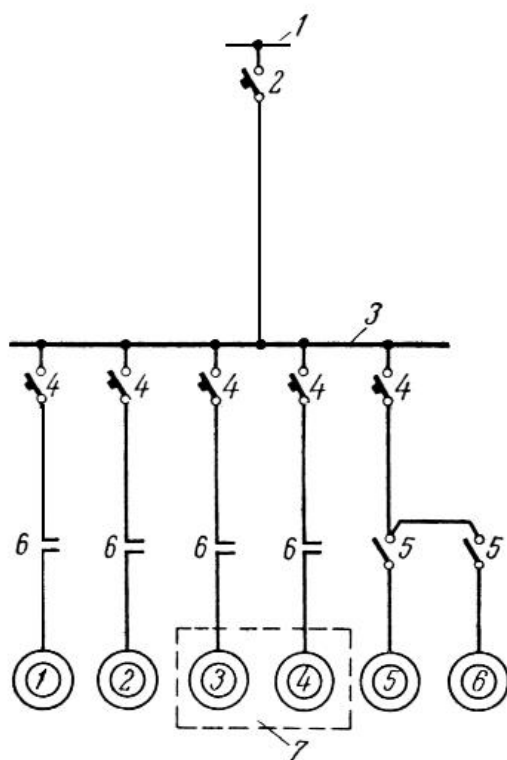


Таблица 4-51 Технические данные электродвигателей

Тип	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, а	Кратность пускового тока	Пусковой ток, а
A2-81-4	40	73,1	5,9	432
A2-81-4	40	73,1	5,9	432
A2-81-4	34	69	6,5	448
МА-145-2/6	4	10,5	5	52,5
МА-142-2/8	4	7,7	5,7	43,8
A02-41-4	4	7,7	5,7	43,8
A02-41-4				

Решение

Так как температура воздуха в помещении равна $+25^{\circ}\text{C}$, то поправочный коэффициент $K_p=1$ и при выборе сечений проводов и кабелей по условию нагрева следует руководствоваться (4-17) и (4-18).

Линия к электродвигателю 1.

Выбираем комбинированный расцепитель автоматического выключателя А3124 по условию длительного тока линии, равного в данном случае номинальному току электродвигателя 1 (см. табл. 4-51).

При выборе расцепителя, встроенного в закрытый шкаф автоматического выключателя, необходимо учесть поправочный коэффициент порядка 0,85. Учитывая сказанное, выбираем расцепитель автоматического выключателя по условию длительного тока линии из соотношения

$$I_{нз} \geq \frac{73,1}{0,85} = 86a$$

По паспортным данным выбираем комбинированный расцепитель с номинальным током 100 а и током мгновенного срабатывания 800 а.

Проверяем невозможность ложного срабатывания автоматического выключателя при пуске двигателя 1 по (4-13):

$$I_{срз} \geq 1,25 \cdot 4,32 = 540; \quad 800a > 540a$$

Для линии к электродвигателю в невзрывоопасном помещении сечение выбирается по номинальному току двигателя из (4-17) с последующей проверкой по (4-18), исходя из условия защиты сети только от к. з.

Расчетное значение допустимого тока линии получается равным:

$$I_{нд} \leq 73,1a$$

По таблице подбираем трехжильный провод с алюминиевыми жилами марки АПРТО сечением 35 мм², для которого допустимая нагрузка равна 75 а.

Проверяем соответствие выбранного сечения провода аппарату токовой защиты. Так как автоматические выключатели серии АЗ100 не имеют регулирования тока уставки, кратность допустимого тока линии должна определяться по отношению к номинальному току расцепителя, равному в нашем случае $I_n = 100$ а. По табл. 4-50 находим значение K_z для сетей, не требующих защиты от перегрузки для номинального тока расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой обратно зависимой от тока характеристикой

$$K_z = 1$$

Подставив числовые значения в соотношение (4-18)

$$75a < 1 \cdot 100 = 100a$$

видим, что требуемое условие не выполняется.

Останавливаемся на сечении провода 50 мм², для которого условие (4-18) выполняется:

$$105a > 100a.$$

Для остальных линий результаты расчета сведены в табл. 4-52 и ниже даются пояснения, связанные с особенностями каждой из них.

Линии к электродвигателю 3.

Линия к электродвигателю 3 имеет следующие особенности. Двигатель 3 установлен во взрывоопасном помещении класса ВІа, в связи с чем:

- 1) за расчетный ток при выборе сечения линии принимается номинальный ток двигателя, увеличенный в 1,25 раза;
- 2) во взрывоопасном помещении класса ВІа не разрешается применение проводов и кабелей с алюминиевыми жилами, следовательно линия от магнитного пускателя до электродвигателя должна быть выполнена проводом с медными жилами (марки ПРТО).

Линия к электродвигателю 4.

Сечение провода ПРТО от магнитного пускателя до двигателя 4 принято равным 2,5 мм², так как меньшее сечение для силовых сетей во взрывоопасных помещениях не допускается.

Линия к электродвигателям 5 и 6.

Расчетный ток линии определяется суммой токов двигателей 5 и 6.

Магистральная линия.

Длительная расчетная токовая нагрузка линии по условию примера определяется суммой токов всех электродвигателей, за исключением тока одного из электродвигателей 1 или 2:

$$I_{дл} = 73,1 + 69 + 10,5 + 2 \cdot 7,7 = 168 \text{ а}$$

Кратковременная токовая нагрузка определяется по (4-9) из условия пуска двигателя 3, у которого толчок пускового тока наибольший:

$$I_{кр} = 448 + 73,1 + 10,5 + 2 \cdot 7,7 = 547 \text{ а}$$

Выбираем электромагнитный расцепитель автоматического выключателя АВ-4С по условию длительного тока линии:

$$I_{нз} \geq 168 \text{ а}$$

Выбираем максимальный расцепитель с номинальным током 200 а. Уставку тока срабатывания принимаем на шкале зависимой от тока характеристики 250 а и на шкале не зависимой от тока характеристики (отсечка с выдержкой времени) 1600 а.

Проверяем невозможность ложного срабатывания автоматического выключателя при пуске электродвигателя 3 по (4-13):

$$1600 > 1,25 \cdot 547 = 682 \text{ а}$$

Определяем табличное значение допустимого длительного тока для кабеля:

$$I_{н.д} \geq 168 \text{ а}$$

Подбираем трехжильный кабель с алюминиевыми жилами до 3 кв сечением 95 мм², для которого допустимая нагрузка равна 190 а.

Проверяем соответствие выбранного сечения кабеля аппарату токовой защиты. Так как автоматические выключатели серии АВ имеют регулирование тока уставки на шкале обратно зависимой от тока характеристики, кратность допустимого тока линии должна определяться по отношению к току срабатывания расцепителя в этой части характеристики, равному в нашем случае $I_z = 250 \text{ а}$. По табл. 4-50 находим значение K_z для сетей, не требующих защиты от перегрузки, для тока срабатывания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависимой от тока характеристикой:

$$K_z = 0,66$$

Подставив числовые значения в (4-18):

$$190 > 0,66 \cdot 250 = 165 \text{ а}$$

найдем, что требуемое условие выполняется.

Таблица 4-52 Таблица для выбора расцепителей и сечений проводов и кабелей из примера

Наименование линий	Расчетный ток линии, а		Номинальный ток расцепителя, а		Уставка тока мгновенного срабатывания расцепителя, а		Кз	Допустимая токовая нагрузка на провод (кабель), а		Марка и сечение провода (кабеля), мм кв
	длительный	кратковременный	расчетный	принятый	расчетный	принятый		расчетный	фактический	
К электродвигателю 1	73,1	432	86	100	540	800	1	100	105	АПРТО
К электродвигателю 2	73,1	432	86	100	540	800	1	100	105	3Х50
К электродвигателю 3:										АПРТО
1)от силового пункта до пускателя	69	448	81,5	100	560	800	1	100	105	3х50
2)от пускателя до двигателя	86,3	-	-	-	-	-	1	100	100	АПРТО
К электродвигателю 4:										3Х50
1)от силового пункта до пускателя	10,5	52,5	12,4	15	66	430	1	15	16	ПРТО
2)от пускателя до двигателя	13,1	-	-	-	-	-	1	15	21	ПРТО
К электродвигателям 5 и 6	15,4	87,6	18	20	110	430	1	20	23	3Х35
Магистраль	168	547	168	200	682	1600	0,66	168	190	АПРТО
										3Х2,5
										ПРТО
										3Х2,5
										АПРТО
										3х4
										ААБГ
										3Х95

2. АКТИВНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНИИ

Активное сопротивление проводов и кабелей из цветных металлов определяется по одной из следующих формул:

$$r = 1000 \frac{\rho}{F}, \quad \text{ом/км} \quad (5-1)$$

$$r = \frac{1000}{\gamma F}, \quad \text{ом/км} \quad (5-2)$$

где r - расчетное удельное сопротивление провода или жилы кабеля, ом мм²/м;

γ - расчетная удельная проводимость провода или жилы кабеля, м/ом мм²;

F - номинальное сечение провода или кабеля, мм².

Значения удельного сопротивления и удельной проводимости для медных проводов и кабелей:

$$\rho_{\text{м}} = 0,0189 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}; \quad \gamma_{\text{м}} = 53 \text{ м/ом} \cdot \text{мм}^2$$

для алюминиевых проводов и кабелей

$$\rho_{\text{а}} = 0,0315 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}; \quad \gamma_{\text{а}} = 31,7 \text{ м/ом} \cdot \text{мм}^2$$

Таблица 5-1 Активные сопротивления проводов и кабелей, ом/км

Сечение провода, мм кв.	Медные провода и кабели	Алюминиевые провода и кабели	Сталеалюминиевые провода
1	18,9	-	-
1,5	12,6	-	-
2,5	7,55	12,6	-
4	4,65	7,90	-
6	3,06	5,26	-
10	1,84	3,16	3,12
16	1,20	1,98	2,06
25	0,74	1,28	1,38
35	0,54	0,92	0,85
50	0,39	0,64	0,65
70	0,28	0,46	0,46
95	0,20	0,34	0,33
120	0,158	0,27	0,27
150	0,123	0,21	0,21
185	0,103	0,17	0,17
240	0,078	0,132	0,132
300	0,062	0,106	0,107
400	0,047	0,08	0,08

Индуктивное сопротивление трехфазной линии с проводами из цветных металлов при частоте переменного тока 50 гц определяется по формуле

$$x = 0,1145 \lg \frac{2D}{d} + 0,016, \quad \text{ом/км} \quad (5-3)$$

где d - внешний диаметр провода, мм;

D - среднее геометрическое расстояние между проводами линии, вычисляемое по формуле

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}, \quad \text{мм} \quad (5-4)$$

где D - расстояния между проводами у каждой пары проводов трехфазной линии, мм.

Активные сопротивления 1 км провода или жилы кабеля приведены в табл. 5-1, индуктивные сопротивления 1 км линии - в табл. 5-2 и 5-4.

Для стальных проводов активное и внутреннее индуктивное сопротивления зависят от протекающего по проводу переменного тока. Общее индуктивное сопротивление воздушной линии, выполненной стальными проводами, определяется как сумма внешнего x' и внутреннего x'' индуктивных сопротивлений:

$$x = x' + x'', \quad \text{ом/км} \quad (5-5)$$

Таблица 5-2 Индуктивные сопротивления воздушных линий, ом/км

Среднее геометрическое расстояние между проводами, мм	Сечение проводов, мм кв										
	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185
Медные провода											
400	0,371	0,355	0,333	0,319	0,308	0,297	0,283	0,274	-	-	-
600	0,397	0,381	0,358	0,345	0,336	0,325	0,309	0,300	0,292	0,287	0,280
800	0,415	0,399	0,377	0,363	0,352	0,341	0,327	0,318	0,310	0,305	0,298
1000	0,429	0,413	0,391	0,377	0,366	0,355	0,341	0,332	0,324	0,319	0,313
1250	0,443	0,427	0,405	0,391	0,380	0,369	0,355	0,346	0,338	0,333	0,327

1500	-	0,438	0,416	0,402	0,391	0,380	0,366	0,357	0,349	0,344	0,338
2000	-	0,457	0,435	0,421	0,410	0,398	0,385	0,376	0,368	0,363	0,357
2500	-	-	0,449	0,435	0,424	0,413	0,399	0,390	0,382	0,377	0,371
3000	-	-	0,460	0,446	0,435	0,423	0,410	0,401	0,393	0,388	0,382
Алюминиевые провода											
600	-	-	0,358	0,345	0,336	0,325	0,315	0,303	0,297	0,288	0,279
800	-	-	0,377	0,363	0,352	0,341	0,331	0,319	0,313	0,305	0,298
1000	-	-	0,391	0,377	0,366	0,355	0,345	0,334	0,327	0,319	0,311
1250	-	-	0,405	0,391	0,380	0,369	0,359	0,347	0,341	0,333	0,328
1500	-	-	-	0,402	0,391	0,380	0,370	0,358	0,352	0,344	0,339
2000	-	-	-	0,421	0,410	0,398	0,388	0,377	0,371	0,363	0,355
Сталеалюминиевые провода											
2000	-	-	-	-	0,403	0,392	0,382	0,371	0,365	0,358	-
2500	-	-	-	-	0,417	0,406	0,396	0,385	0,379	0,272	-
3000	-	-	-	-	0,429	0,418	0,408	0,397	0,391	0,384	0,377

Таблица 5-4 Индуктивные сопротивления трехжильных кабелей и изолированных проводов, проложенных на роликах и изоляторах, ом/км

Сечение, мм кв.	Трехжильные кабели с медными жилами				Изолированные провода	
	до 1 кв	3 кв	6 кв	10 кв	на роликах	на изоляторах
1,5	-	-	-	-	0,28	0,32
2,5	-	-	-	-	0,26	0,30
4	0,095	0,111	-	-	0,25	0,29
6	0,090	0,104	-	-	0,23	0,28
10	0,073	0,0825	0,11	0,122	0,22	0,26
16	0,0675	0,0757	0,102	0,113	0,22	0,24
25	0,0662	0,0714	0,091	0,099	0,20	0,24
35	0,0637	0,0688	0,087	0,095	0,19	0,24
50	0,0625	0,0670	0,083	0,09	0,19	0,23
70	0,0612	0,0650	0,08	0,086	0,19	0,23
95	0,0602	0,0636	0,078	0,083	0,18	0,23
120	0,0602	0,0626	0,076	0,081	0,18	0,22
150	0,0596	0,0610	0,074	0,079	-	-
185	0,0596	0,0605	0,073	0,077	-	-
240	0,0587	0,0595	0,071	0,075	-	-

Таблица 5-6 Активные (омические) и индуктивные сопротивления шин прямоугольного сечения из алюминия и меди

Размеры шин, мм	Активное (омическое) сопротивление при температуре шины +30° С, ом/км				Индуктивное сопротивление при расстоянии между центрами шин 250 мм, ом/км
	Алюминиевые шины		Медные шины		
	при постоянном токе	при переменном токе	при постоянном токе	при переменном токе	
25X3	0,410	0,418	0,248	0,263	0,253
30X4	0,256	0,269	0,156	0,175	0,240
40X4	0,192	0,211	0,117	0,138	0,224
40X5	0,154	0,173	0,0935	0,112	0,222
50X5	0,123	0,140	0,0749	0,0913	0,210
50X6	0,102	0,119	0,0624	0,0780	0,208
60X6	0,0855	0,102	0,0520	0,0671	0,198
80X6	0,0640	0,0772	0,0390	0,0507	0,182
100X6	0,0510	0,0635	0,0312	0,0411	0,169
60X8	0,0640	0,0772	0,0390	0,0507	0,196
80X8	0,0481	0,0595	0,0293	0,0395	0,179

100X8	0,0385	0,0488	0,0234	0,0321	0,168
120X8	0,0320	0,0410	0,0195	0,0271	0,156
80X10	0,0385	0,0495	0,0234	0,0323	0,179
100X10	0,0308	0,0398	0,0187	0,0260	0,165
120X10	0,0255	0,0331	0,0156	0,0218	0,156

3. РАСЧЕТ СЕТИ ПО ДОПУСТИМОЙ ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ БЕЗ УЧЕТА ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНИИ

Без учета индуктивного сопротивления линии на потерю напряжения рассчитываются:

- 1) сети постоянного тока;
- 2) линии сети переменного тока, для которых коэффициент мощности равен 1 ($\cos\varphi=1$);
- 3) сети, выполненные проводами внутри зданий или кабелями, если их сечения не превосходят указанных в табл. 5-8 значений.

При заданном сечении проводов линии потеря напряжения определяется по формуле

$$U = \alpha_1 \frac{M_a}{F} \quad (5-6)$$

Сечение при заданной потере напряжения вычисляется по формуле

$$F = \alpha_1 \frac{M_a}{\Delta U}, \text{ мм}^2 \quad (5-7)$$

где F - сечение провода, мм²;

DU - потеря напряжения в линии, в или %;

Ma - сумма моментов нагрузки, т. е. сумма произведений активных нагрузок, передаваемых по участкам линии, на длины этих участков;

α_1 - коэффициент, зависящий от системы тока и принятых при вычислениях единиц измерения для входящих в формулу величин.

Значения и единицы измерения величин, входящих в (5-6) и (5-7), приведены в табл. 5-9.

Таблица 5-8 Максимальные значения сечений проводов и кабелей, для которых допустимо вести расчет на потерю напряжения без учета индуктивного сопротивления проводов (для сети переменного тока с частотой 50 гц); М-медные, А-алюминиевые

Коэффициент мощности	0,95		0,9		0,85		0,8		0,75		0,7	
Материал проводов	М	А	М	А	М	А	М	А	М	А	М	А
Кабели до 1 кв	70	120	50	95	35	70	35	50	25	50	25	35
Кабели 6-10 кв	50	95	35	50	25	50	25	35	16	25	16	25
Провода в трубах	50	95	35	50	35	50	25	35	16	25	16	25
Провода на роликах	25	35	16	25	10	16	10	10	6	10	6	10
Провода на изоляторах	16	25	10	16	10	16	6	10	6	10	6	6

Таблица 5-9 Значения и единицы измерения величин, входящих в формулы (5-6) и (5-7)

Система тока	Сумма моментов нагрузок по участкам линий		Потеря напряжения ΔU	Значение коэффициента α_1	Числовое значение коэффициента α_1 для алюминиевых (числитель) и медных (знаменатель) проводов и кабелей при номинальном междуфазном напряжении, кв				
	M_a	Единицы измерения			0,22	0,38	0,66	6	10
Однофазный переменный или	$\sum I l$	а м	в	$\frac{2}{\gamma}$	$\frac{0,0631}{0,0377}$				

постоянный ток			%	$\frac{2}{10\gamma U_H}$	$\frac{0,0287}{0,0171}$	$\frac{0,0166}{0,00992}$	$\frac{0,00956}{0,00571}$	-	-
	$\sum Pl$	кВт м	В	$\frac{2}{\gamma U_H}$	$\frac{0,287}{0,171}$	$\frac{0,166}{0,0992}$	$\frac{0,0957}{0,0571}$	-	-
			%	$\frac{2}{10\gamma U_H^2}$	$\frac{0,130}{0,0777}$	$\frac{0,0437}{0,0261}$	$\frac{0,0145}{0,00865}$	-	-
Трёхфазный переменный ток	$\sum I_d l$	а м	В	$\frac{\sqrt{3}}{\gamma}$	$\frac{0,0545}{0,0326}$				
			%	$\frac{\sqrt{3}}{10\gamma U_H}$	$\frac{0,0248}{0,0148}$	$\frac{0,0143}{0,00858}$	$\frac{0,00826}{0,00494}$	-	-
	$\sum Pl$	кВт м	В	$\frac{1}{\gamma U_H}$	$\frac{0,143}{0,0855}$	$\frac{0,083}{0,0496}$	$\frac{0,0478}{0,0286}$	-	-
			%	$\frac{1}{10\gamma U_H^2}$	$\frac{0,0653}{0,0389}$	$\frac{0,0219}{0,0131}$	$\frac{0,00725}{0,00433}$	-	-
		кВт км	В	$\frac{1000}{\gamma U_H}$	$\frac{143,0}{85,5}$	$\frac{83,0}{49,6}$	$\frac{47,8}{28,6}$	$\frac{5,25}{3,14}$	$\frac{3,16}{1,89}$
			%	$\frac{100}{\gamma U_H^2}$	$\frac{65,3}{38,9}$	$\frac{21,9}{13,1}$	$\frac{7,25}{4,33}$	$\frac{0,0875}{0,0523}$	$\frac{0,0316}{0,0189}$
		МВт км	В	$\frac{10^6}{\gamma U_H}$	-	-	-	$\frac{5250}{3140}$	$\frac{3160}{1890}$
			%	$\frac{10^5}{\gamma U_H^2}$	-	-	-	$\frac{87,5}{52,3}$	$\frac{31,6}{18,9}$
	$\sum Pl$	кВт м	%	$\frac{6}{10\gamma U_H^2}$	$\frac{0,392}{0,233}$	$\frac{0,131}{0,0786}$	-	-	-
			%	$\frac{2,25}{10\gamma U_H^2}$	$\frac{0,147}{0,0875}$	$\frac{0,0493}{0,0295}$	-	-	-

Удельная проводимость

$\gamma, \text{м} / \text{ом} \cdot \text{мм}^2$

Номинальное междуфазное (линейное) напряжение

$U_H, \text{кВ}$

Пример 5-1

На рис. 5-1 дана расчетная схема воздушной четырехпроводной сети 380/220 в. Длины участков сети указаны на схеме в километрах, нагрузки - в киловаттах, коэффициент

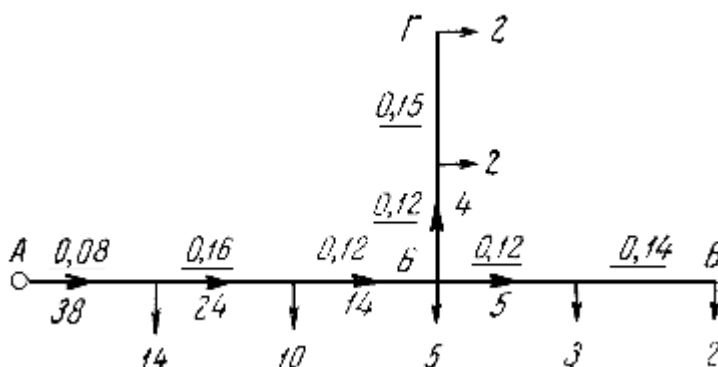
мощности $\cos \varphi = 1$. Произвести расчет сети на потерю напряжения, если допустимая потеря напряжения $\Delta U = 4\%$. Материал проводов сети - алюминий.

Решение.

Расчет производим по формулам (5-6) и (5-7). Находим из табл. 5-9 значения коэффициента α_1 для нагрузок, выраженных в киловаттах, длин участков линии в километрах и потери напряжения в процентах. При этих условиях получим:

$$\alpha_1 = \frac{100}{\gamma U_H^2}$$

Рисунок 5-1



В нашем случае номинальное междуфазное напряжение сети $U_H = 0,38$ кв; удельная проводимость алюминия $\gamma = 31,7$ м/ом мм², откуда числовое значение коэффициента

$$\alpha_1 = \frac{100}{31,7 \cdot 0,38^2} = 21,9 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кв}^2$$

Числовое значение коэффициента α_1 можно непосредственно получить из табл. 5-9. Определяем значения M_a для основной магистрали и ответвлений:

$$M_{aAB} = 38 \cdot 0,08 + 24 \cdot 0,16 + 14 \cdot 0,12 = 8,56 \text{ квт} \cdot \text{км}$$

$$M_{aBB} = 5 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,14 = 0,88 \text{ квт} \cdot \text{км}$$

$$M_{aBG} = 4 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,15 = 0,78 \text{ квт} \cdot \text{км}$$

Наибольшее значение M_a получается на участке АБВ:

$$M_{a, \max} = 8,56 + 0,88 = 9,44 \text{ квт} \cdot \text{км}$$

Подставив числовые значения в (5-7), определим минимально допустимое сечение линии по условию потери напряжения:

$$F = \alpha_1 \frac{M_a}{\Delta U} = 21,9 \cdot \frac{9,44}{4} = 51,5 \text{ мм}^2$$

Принимаем сечение фазных проводов для магистрали АБ равным:

$$F_{AB} = 70 \text{ мм}^2$$

Находим потерю напряжения в магистрали АВ по (5-6):

$$\Delta U_{AB} = \alpha_1 \frac{M_{aAB}}{F_{AB}} = 21,9 \cdot \frac{8,56}{70} = 2,68\%$$

Потеря напряжения, допустимая для ответвлений БВ и БГ,

$$\Delta U_{\Sigma} = 4 - 2,68 = 1,32\%$$

Определяем сечение ответвления БВ:

$$F_{BB} = 21,9 \cdot \frac{0,88}{1,32} = 14,6 \text{ мм}^2$$

и сечение ответвления БГ:

$$F_{BG} = 21,9 \cdot \frac{0,78}{1,32} = 12,9 \text{ мм}^2$$

По условию механической прочности принимаем сечения фазных и нулевого проводов для ответвлений БВ и БГ равными 16 мм².

4. РАСЧЕТ СЕТИ ПО ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ИНДУКТИВНОСТИ ЛИНИЙ

Потери напряжения при заданном сечении проводов линии с учетом индуктивного сопротивления линии при различных коэффициентах мощности нагрузок линии определяется по формуле

$$\Delta U = \alpha_2 (rM_a + xM_r) \quad (5-8)$$

при одинаковом коэффициенте мощности для всех нагрузок линии

$$\Delta U = \alpha_2 (r \cos \varphi + x \sin \varphi) M \quad (5-9)$$

где DU- потеря напряжения в линии, в или %;

r и x - активное и индуктивное сопротивления линии, ом/км;

Ma - сумма моментов активных нагрузок;

Mr - сумма моментов реактивных нагрузок;

M - сумма моментов полных нагрузок;

α_2 - коэффициент, зависящий от системы тока и принятых единиц измерения для входящих в формулы величин.

Значения α_2 и единицы измерения величин, входящих в (5-8) и (5-9), приведены в таблице 5-12.

Выбор сечения проводов линии по заданной величине потери напряжения с учетом индуктивности линии производится следующим образом. Определяется значение расчетной величины потери напряжения по формуле

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r \quad (5-10)$$

где ΔU - допустимая потеря напряжения в линии, в или %;

M_r - максимальное значение суммы моментов реактивных нагрузок для рассчитываемой линии;

x_{cp} - среднее индуктивное сопротивление линии, ом/км.

Значения средних индуктивных сопротивлений линии даны в табл. 5-13.

В дальнейшем расчет производится по (5-6) и (5-7). По окончании расчета величина потери напряжения в линии уточняется по (5-8) или (5-9).

Таблица 5-12 Значения и единицы измерения величин, входящих в формулы (5-8) и (5-9)

Системы тока	Сумма моментов нагрузок по участкам линий						Потери напря- жения	Значение коэффи- циента α_2	Числовое значение коэффициента α_2 при номинальном междуфазном напряжении, кв				
	активных		реактивных		полных				0,22	0,38	0,66	6	10
	M_a	единица измерения	M_r	единица измерения	M	единица измерения							
Однофазный переменный ток	$\sum I_a l$	$a \cdot км$	$\sum I_r l$	$a \cdot км$	$\sum \Pi$	$a \cdot км$	в	2	2				
							%	$\frac{2}{10U_H}$	0,909	0,526	0,303	0,0333	0,02
	$\sum Pl$	$квт \cdot км$	$\sum Ql$	$квар \cdot км$	$\sum Sl$	$кВа \cdot км$	в	$\frac{2}{U_H}$	9,09	5,26	3,03	0,333	0,2
							%	$\frac{2}{10U_H^2}$	4,13	1,38	0,459	0,00555	0,002
Трехфазный переменный ток	$\sum I_a l$	$a \cdot км$	$\sum I_r l$	$a \cdot км$	$\sum \Pi$	$a \cdot км$	в	$\sqrt{3}$	1,73				
							%	$\frac{\sqrt{3}}{10U_H}$	0,787	0,455	0,263	0,0289	0,0173
	$\sum Pl$	$квт \cdot км$	$\sum Ql$	$квар \cdot км$	$\sum Sl$	$кВа \cdot км$	в	$\frac{1}{U_H}$	4,55	2,63	1,52	0,167	0,1
							%	$\frac{1}{10U_H^2}$	2,07	0,69	0,23	0,00278	0,001
	$\sum Pl$	$Мвт \cdot км$	$\sum Ql$	$Мвар \cdot км$	$\sum Sl$	$МВа \cdot км$	в	$\frac{1000}{U_H}$	-	-	-	167	100
							%	$\frac{100}{U_H^2}$	-	-	-	2,78	1

Таблица 5-13

Характеристика сети	Средние значения индуктивных сопротивлений, ом/км
Кабель до 1 кв	0,06
Кабель 6-10 кв	0,08
Изолированные провода на роликах	0,2
Изолированные провода на изоляторах	0,25
Воздушные линии до 1 кв	0,3
Воздушные линии 6-10 кв	0,4

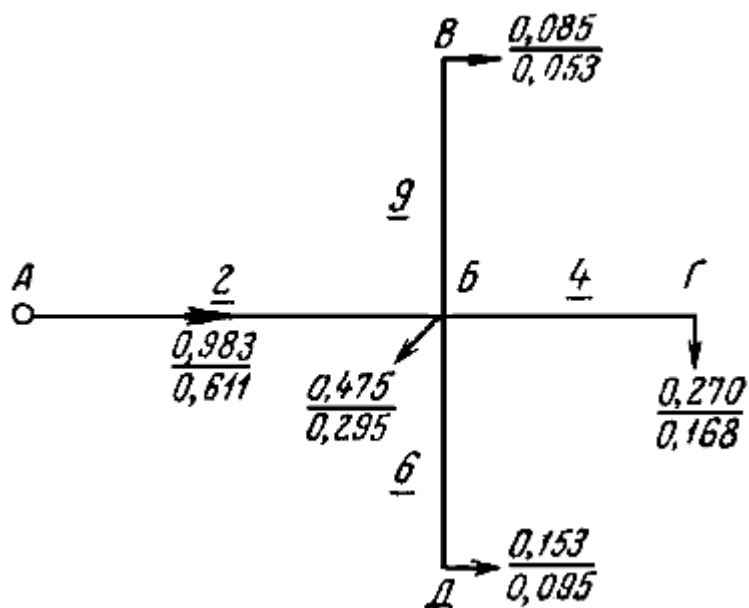
Пример 5-2

На рис. 5-2 дана расчетная схема воздушной трехфазной линии 6 кв. Активные нагрузки в мегаваттах на схеме указаны в числителях дробей, реактивные нагрузки в мега-варах - в знаменателях, их длины линий - в километрах. Коэффициент мощности для всех нагрузок сети одинаков и равен 0,85. Произвести расчет линии на потерю напряжения с учетом индуктивности проводов. Материал проводов - алюминий. Среднее расстояние между проводами $D_{ср}=1250$ мм. Допустимая потеря напряжения $\Delta U=6,5\%$.

Решение.

Определяем моменты активных и реактивных нагрузок участков линии:

Рисунок 5-2



Обозначения участка линии	Ma, МвтЧкм	Mr, МварЧкм
АБ	0,983 Ч 2=1,97	0,611 Ч 2=1,222
БВ	0,085 Ч 9=0,765	0,053 Ч 9=0,477
БГ	0,27 Ч 4=1,08	0,168 Ч 4=0,672
БД	0,153 Ч 6=0,92	0,095 Ч 6=0,57

Из табл. 5-12

$$\alpha_2 = 2,78 \text{ 1/кв}^2$$

Из табл. 5-13

$$x_{cp} = 0,4 \text{ ом/км}$$

Максимальная величина M_r (для участка линии АБГ)

$$M_{rAB} = 1,222 + 0,672 = 1,894 \text{ Мвар} \cdot \text{км}$$

Определяем расчетную величину потери напряжения по (5-10):

$$\Delta U_a = 6,5 - 2,78 \cdot 0,4 \cdot 1,894 = 4,4\%$$

Определяем сечение провода по (5-7). Значение коэффициента α_1 по табл. 5-9

$$\alpha_1 = 87,5 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кв}^2$$

Максимальная величина Ma (для участка линии АБГ)

$$M_a = 1,97 + 1,08 = 3,05 \text{ Мвт} \cdot \text{км}$$

Минимальное сечение линии

$$F = 87,5 \cdot \frac{3,05}{4,4} = 60,7 \text{ мм}^2$$

Принимаем сечение магистрали АБ равным 70 мм². Определяем потерю напряжения на участке АБ по (5-6):

$$\Delta U_{aAB} = 87,5 \cdot \frac{1,97}{70} = 2,46\%$$

Потеря напряжения, допустимая для ответвлений от точки Б линии

$$\Delta U_{aB} = 4,4 - 2,46 = 1,94\%$$

Определяем сечения проводов ответвлений:

$$F_{БВ} = 87,5 \cdot \frac{0,765}{1,94} = 34,5 \text{ мм}^2 \text{ (принимаем провод А35)}$$

$$F_{БГ} = 87,5 \cdot \frac{1,08}{1,94} = 48,3 \text{ мм}^2 \text{ (принимаем провод А50)}$$

$$F_{БД} = 87,5 \cdot \frac{0,82}{1,94} = 41,5 \text{ мм}^2 \text{ (принимаем провод А50)}$$

Находим значения активных и индуктивных сопротивлений из табл. [5-1](#) и [5-2](#) и уточняем значения потерь напряжения до точек В, Г и Д линии по (5-8):

$$\Delta U_{АБВ} = 2,78[(0,46 \cdot 1,97 + 0,359 \cdot 1,222) + (0,92 \cdot 0,765 + 0,38 \cdot 0,477)] = 6,2\%$$

$$\Delta U_{АБГ} = 6,36\% \text{ и } \Delta U_{АБД} = 5,96\%$$

Проверочный расчет показывает, что все принятые сечения удовлетворяют условию задачи.

5. Расчет сети при помощи вспомогательных таблиц удельных потерь напряжения

В табл. [5-14-5-26](#) приведены удельные потери напряжения для электропроводок, воздушных и кабельных линий и токопроводов в зависимости от величины коэффициента мощности. Для проводов и кабелей из цветного металла эти потери выражены в процентах на 1 кВт м, кВт км или Мвт км в зависимости от напряжения линии.

Потеря напряжения в линии при заданном сечении проводов и кабелей из цветных металлов определяется по формуле

$$\Delta U = \Delta U_{тб} M_a \quad (5-13)$$

где M_a - сумма произведений активных нагрузок на длины участков линии (кВт м, кВт км, Мвт км);

$\Delta U_{тб}$ - табличное значение удельной величины потери напряжения в процентах на 1 кВт м, кВт км или Мвт км.

Определение сечения проводов по заданной величине потери напряжения производится следующим образом. Определяется расчетное значение $\Delta U_{тб}$ по формуле

$$\Delta U_{тб} \leq \frac{\Delta U}{M_a} \quad (5-14)$$

и по соответствующей таблице подбирается сечение провода с ближайшим меньшим значением удельной потери напряжения.

Потеря напряжения в линии для стальных проводов определяется по формуле

$$\Delta U = \Delta U_{тб} l \quad (5-15)$$

где l - длина линии, км;

$\Delta U_{тб}$ - табличное значение удельной потери напряжения, в/км.

Расчетное значение удельной потери напряжения при определении сечения проводов по заданной допустимой величине потери напряжения вычисляется по формуле

$$\Delta U \leq \frac{\Delta U}{l} \quad (5-16)$$

Для промежуточных значений тока линии величина потери напряжения определяется интерполяцией по формуле

$$\Delta U_{\text{тб}} = \Delta U_{\text{тб}}^{\cdot} - (\Delta U_{\text{тб}}^{\cdot} - \Delta U_{\text{тб}}^{\cdot\cdot}) \frac{I - I^{\cdot}}{I^{\cdot\cdot} - I^{\cdot}} \quad (5-17)$$

где $\Delta U_{\text{тб}}^{\cdot}$ - табличное значение потери напряжения для наименьшего тока I^{\cdot} , %/а·км;

$\Delta U_{\text{тб}}^{\cdot\cdot}$ - то же для наибольшего тока $I^{\cdot\cdot}$, %/а·км;

$\Delta U_{\text{тб}}$ - потеря напряжения для промежуточного тока I , %/а·км.

Пример 5-4

Произвести расчет линии по примерам [5-1](#), [5-2](#), при помощи таблиц удельных потерь напряжения.

Решение.

1. Из примера [5-1](#) наибольшее значение $M_a=9,44$ кВт км. Допустимая потеря напряжения $\square U=4\%$.

Находим расчетное значение удельной потери напряжения по (5-14):

$$\Delta U_{\text{тб}} \leq \frac{4}{9,44} = 0,425 \text{ \% / кВт} \cdot \text{км}$$

Из табл. [5-17](#) для воздушной линии 380/220 в при $\cos \varphi = 1$ находим сечение

алюминиевого провода 70 мм кв, для которого $\Delta U_{\text{тб}} = 0,319 \text{ \% / кВт} \cdot \text{км}$

Определяем потерю напряжения в магистрали АБ по (5-13):

$$\Delta U_{\text{АБ}} = 0,319 \cdot 8,56 = 2,73\%$$

Расчетные значения удельной потери напряжения для ответвления БВ

$$\Delta U_{\text{тб}} \leq \frac{4 - 2,73}{0,88} = 1,44 \text{ \% / кВт} \cdot \text{км}$$

для ответвления БГ

$$\Delta U_{\text{тб}} \leq \frac{4 - 2,73}{0,78} = 1,63 \text{ \% / кВт} \cdot \text{км}$$

В обоих случаях по табл. [5-17](#) принимаем провод сечением 16 мм кв

2. Из примера [5-2](#) $M_a=3,05$ Мвт км, $\square U=6,5\%$

По (5-14) получаем:

$$\Delta U_{\text{тб}} \leq \frac{6,5}{3,05} = 2,13 \text{ \% / Мвт} \cdot \text{км}$$

По табл. 5-22 для алюминиевого провода при $\cos \varphi = 0,85$ находим сечение 70 мм кв, для которого $\Delta U_{\text{тб}} = 1,9 \text{ \%}/\text{Мвт км}$. Потеря напряжения в магистрали по (5-13)

$$\Delta U_{AB} = 1,9 \cdot 1,97 = 3,75 \text{ \%}$$

Потеря напряжения, допустимая для ответвлений от магистрали в точке Б, равна:

$$\Delta U_{\text{Б}} = 6,5 - 3,75 = 2,75 \text{ \%}$$

Расчетные значения удельных потерь напряжения:
для ответвления БВ

$$\Delta U_{\text{тб}} = \frac{2,75}{0,765} = 3,60 \text{ \%}/\text{Мвт} \cdot \text{км} \text{ (провод А35)}$$

для ответвления БГ

$$\Delta U_{\text{тб}} = \frac{2,75}{1,08} = 2,54 \text{ \%}/\text{Мвт} \cdot \text{км} \text{ (провод А50)}$$

для ответвления БД

$$\Delta U_{\text{тб}} = \frac{2,75}{0,92} = 3,0 \text{ \%}/\text{Мвт} \cdot \text{км} \text{ (провод А50)}$$

Пример 5-5

От трансформаторного пункта промышленного предприятия получает питание магистральный токопровод АБВ типа ШМА 59-1, к которому присоединены распределительные токопроводы БГ, ВД и ВЕ типа ШРА 60-6 (рис. 5-3). Длины участков токопроводов и нагрузки распределительных токопроводов указаны на рис. 5-3. Нагрузки распределены равномерно вдоль токопроводов. Номинальное напряжение сети 380 в, коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,7$.

Определить потерю напряжения в токопроводах до наиболее удаленных точек Г, Д, Е.

Решение.

Определяем моменты активных нагрузок на отдельных участках токопровода.

Магистральный токопровод:

$$\text{участок } AB \quad 610 \cdot 0,14 = 85,5 \text{ квт} \cdot \text{км};$$

$$\text{участок } BV \quad 360 \cdot 0,03 = 10,8 \text{ квт} \cdot \text{км}.$$

Распределительные токопроводы:

$$\text{участок } BG \quad 250 \cdot 0,065 = 16,2 \text{ квт} \cdot \text{км};$$

$$\text{участок } VE \quad 200 \cdot 0,05 = 10 \text{ квт} \cdot \text{км};$$

$$\text{участок } VD \quad 160 \cdot 0,04 = 6,4 \text{ квт} \cdot \text{км}.$$

При $\cos \varphi = 0,7$ значения удельных потерь напряжения: для магистрального токопровода типа ШМА 59-1 $\Delta U_{\text{тб}} = 0,0308 \text{ \%}/\text{квт км}$ и для распределительного токопровода типа ШРА 60-6 $\Delta U_{\text{тб}} = 0,133 \text{ \%}/\text{квт км}$.

Пользуясь (5-13), определяем потерю напряжения до конца Г распределительного токопровода БГ:

$$\Delta U_{AG} = 0,0308 \cdot 85,5 + 0,133 \cdot 16,2 = 4,8\%$$

Аналогично определяем потери напряжения до точек Д и Е:

$$\Delta U_{AD} = 3,82\% \quad \Delta U_{AE} = 4,3\%$$

6. Выбор проводников по термической и динамической устойчивости к току к.з.

Проводники и токопроводы в электрических сетях выше 1000 в, как правило, подлежат проверке на условия нагрева током к. з.

В электрических сетях до 1000 в на термическую устойчивость проверяются только токопроводы.

Повышение температуры жил изолированных проводников и кабелей в результате прохождения тока к. з. ведет к химическому разложению изоляции и резкому снижению ее электрической и механической прочности, а следовательно, и к возможности аварии. Поэтому установлены определенные максимально допустимые пределы температур в режиме к. з., указанные в табл. 6-1.

Проверка кабелей на нагревание от токов к. з. должна производиться:

- 1) для одиночных кабелей небольшой протяженности, исходя из к. з. в начале кабеля;
- 2) для одиночных кабелей, имеющих соединительные муфты, исходя из к. з. с начала каждого участка, с тем чтобы иметь возможность ступенями уменьшать сечение кабеля по его длине;
- 3) для двух и более параллельно включенных кабелей, исходя из к. з. непосредственно за пучком {по сквозному току}.

Допускается не проверять проводники по режиму к. з. в случае их защиты плавкими предохранителями. Линия считается защищенной предохранителем, когда отключающая способность предохранителя достаточна для отключения наибольшего возможного аварийного тока линии.

Для линий к индивидуальным электроприемникам, в том числе к цеховым трансформаторам общей мощностью до 1000 кВА включительно, допускается не проверять сечения проводников по току к. з. при одновременном соблюдении следующих условий:

1. В электрической или технологической части предусмотрено резервирование, гарантирующее от расстройства производственного процесса.
2. Повреждение проводников при к. з. не может вызвать взрыва.
3. Возможна замена проводников без значительных затруднений.

Для линий к индивидуальным электроприемникам или небольшим распределительным пунктам неотвественного назначения допускается не производить проверку проводников на термическую устойчивость при к. з., если обеспечивается только одно условие 2 (отсутствие опасности взрыва).

Провода воздушных линий до 10 кВ не проверяются по току к. з.

Допустимые величины тока к. з. для кабелей определяются в зависимости от материала и сечения кабеля и длительности прохождения тока к. з.

Термическое действие тока к. з. в течение действительного времени прохождения его t_d , характеризуется величиной фиктивного времени t_f прохождения установившегося тока к. з. с одинаковым по термическому действию эффектом.

Фиктивное время определяется в зависимости от отношения

$$\beta = \frac{I''}{I_{\infty}} \quad (6-1)$$

где I'' - действующее значение периодической составляющей тока к. з. в начальный момент, а

I_{∞} - установившийся ток к. з. (действующее значение), а.

Действительное время I_d складывается из выдержки времени, установленной на максимально-токовой защите линии, и собственного времени отключающего аппарата (выключателя мощности).

При проверке на термическую устойчивость проводников линий, оборудованных быстродействующим автоматическим повторным включением, должно учитываться повышение нагревания проводников из-за увеличения суммарной продолжительности к. з.

При расчетах тока к. з. в распределительных сетях 6-10 кв весьма часто затухание не учитывают. В этом случае фиктивное время может быть принято равным действительному и задача проверки проводников на термическую устойчивость упрощается отсутствием необходимости определения фиктивного времени.

Сечение, обеспечивающее термическую устойчивость проводника к току к. з. при заданной величине фиктивного времени t_f , определяется из выражения

$$F = I_{\infty} \frac{\sqrt{t_f}}{C} \quad (6-2)$$

где F -сечение жилы кабеля, мм кв

C - постоянная, определяемая в зависимости от заданной ПУЭ конечной температуры нагревания жил и напряжения; числовые значения постоянной C - указаны в табл. 6-1.

Ниже приведена табл. 6-2 для проверки кабелей на термическую устойчивость, составленная по формуле (6-2) в величинах допустимого установившегося тока к. з. в килоамперах.

В дополнение к расчету на термическую устойчивость сечение шин токопроводов должно быть проверено также на механическую прочность при к. з. (динамическая устойчивость токопровода).

Таблица 6-1 Допустимые температуры нагревания проводников и шин при к. з.

Вид и материал проводника	Наибольшая допустимая температура, °C	Значение коэффициента c
Шины медные		
Шины алюминиевые		165
Шины стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратом	300	90
	200	66
Шины стальные с непосредственным соединением с аппаратом	400	60
	300	<u>98</u>
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией напряжением до 10 кв с медными и алюминиевыми жилами	200	<u>145</u>
Кабели и изолированные провода с полихлорвиниловой или резиновой изоляцией с медными и алюминиевыми жилами	150	<u>83</u>
Медные голые провода при тяжениях менее $2 \text{ кг} / \text{мм}^2$	250	165
То же при тяжениях более $2 \text{ кг} / \text{мм}^2$	200	145
	200	98
Алюминиевые голые провода при тяжениях менее $1 \text{ кг} / \text{мм}^2$	160	85
То же при тяжениях более $1 \text{ кг} / \text{мм}^2$	200	98
Алюминиевая часть сталеалюминиевых проводов		

Примечания: 1. Значения величины C определены при средних рабочих температурах 75 °С для шин и 50 °С для проводов и кабелей.

2. В числителях дробей указаны значения величины C для алюминия, в знаменателях - для меди.

Таблица 6-2 Допустимые величины тока к. з. кабелей с бумажной изоляцией на напряжение 6-10 кв по условиям термической устойчивости, кА

t_{ϕ}	Сечение кабелей, мм кв								
	16	25	35	50	70	95	120	150	185
Алюминиевые жилы									
0,25	3,12	4,88	6,85	9,75	13,70	18,50	23,40	29,25	36,00 25,45
0,5	2,20	3,45	4,80	6,90	9,65	13,00	16,50	20,00	20,50
0,75	1,80	2,80	3,95	5,60	7,90	10,65	13,50	16,90	18,00
1,0	1,56	2,44	3,40	4,85	6,80	9,25	11,80	14,60	14,75
1,5	1,28	2,00	2,80	4,00	5,55	7,55	9,55	11,90	12,75
2,0	1,10	1,72	2,40	3,45	4,80	6,55	8,25	10,30	11,40
2,5	0,985	1,54	2,16	3,08	4,30	5,85	7,40	9,20	10,40
3,0	0,90	1,40	1,97	2,80	3,95	5,35	6,75	8,40	9,60
3,5	0,83	1,30	1,80	2,60	3,65	4,95	6,25	7,80	9,00
4,0	0,78	1,24	1,70	2,44	3,40	4,65	5,85	7,30	8,50
4,5	0,73	1,15	1,60	2,30	3,20	4,35	5,50	6,90	8,10
5,0	0,70	1,10	1,52	2,18	3,00	4,15	5,23	6,53	7,70
5,5	0,66	1,04	1,45	2,10	2,90	3,95	5,00	6,23	7,35
6,0	0,640	1,00	1,40	2,00	2,80	3,80	4,80	6,00	
Медные жилы									
0,25	4,63	7,25	10,2	14,5	20,2	27,5	34,8	43,5	53,5
0,5	3,28	5,12	7,16	10,4	14,3	19,5	24,6	30,7	38,0
0,75	2,68	4,19	5,85	8,37	11,7	15,9	20,0	25,0	31,0
1,0	2,32	3,63	5,00	7,25	10,1	13,8	17,4	21,8	26,8
1,5	1,90	2,96	4,15	5,92	8,30	11,3	14,2	17,8	21,9
2,0	1,64	2,56	3,58	5,12	7,18	9,72	12,3	16,6	19,0
2,5	1,47	2,30	3,20	4,58	6,42	8,71	11,0	13,8	17,0
3,0	1,34	2,10	2,93	4,19	5,86	7,95	10,0	12,6	15,5
3,5	1,24	1,94	2,71	3,88	5,43	7,36	9,30	11,6	14,4
4,0	1,16	1,81	2,50	3,62	5,05	6,90	8,70	10,9	13,4
4,5	1,09	1,70	2,39	3,41	4,78	6,48	8,20	10,2	12,6
5,0	1,04	1,62	2,27	3,25	4,55	6,16	7,80	9,75	12,0
5,5	0,99	1,55	2,16	3,09	4,32	5,86	7,40	9,25	11,4
6,0	0,95	1,48	2,07	3,06	4,15	5,63	7,10	8,88	11,0

Пример 6-1.

Требуется выбрать кабель 6 кв с алюминиевыми жилами, термически устойчивый к току

к. з. $I_{\infty} = 5 \text{ кА}$, полагая, что затухание к. з. практически отсутствует. Выдержка времени максимальной защиты со стороны пункта питания 0,5 сек.

Решение.

При практическом отсутствии затухания фиктивное время может быть принято равным действительному, а последнее складывается из выдержки времени максимальной защиты линии и собственного времени масляного выключателя и реле, которые в сумме могут быть приняты равными 0,25 сек.

Следовательно,

$$t_{\phi} = t_d = 0,5 + 0,25 = 0,75 \text{ сек}$$

Обращаясь к табл. 6-2, для времени 0,75 сек определяем, что кабелю с алюминиевыми жилами сечением 3 X 50 мм кв соответствует допустимая величина тока к. з. 5,6 ка, т. е.

при заданном значении $I_{\infty} = 5 \text{ ка}$ кабель окажется термически устойчивым. То же самое можем получить непосредственно из (6-2):

$$F = 5 \cdot 1000 \cdot \frac{\sqrt{0,75}}{98} = 44 \text{ мм}^2$$

Пример 6-2.

Какую максимальную выдержку времени следует установить на масляном выключателе питающей линии, выполненной кабелем марки СБ сечением 3 X 70 мм кв при установившемся к. з. замыкания 11 кА?

Затухание, как и в предыдущем примере, полагаем практически отсутствующим.

Решение.

По табл. 6-2 в графе для медного кабеля сечением 70 мм кв находим значение тока к. з., превышающее заданную величину. Имеем 11,7 кА. Это соответствует фиктивному времени 0,75 сек. Следовательно, полагая, что собственное время выключателя мощности и реле, как и в первом примере, не будет превосходить 0,25 сек, убеждаемся, что максимальная выдержка времени защиты линии, для того чтобы кабель оставался устойчивым к термическому действию тока к. з., не должна превышать 0,5 сек.

Пример 6-3.

В цехе промышленного предприятия прокладывается распределительный токопровод с алюминиевыми шинами. Расчетная нагрузка токопровода 350 а; токопровод защищен селективным автоматическим выключателем типа АВ-4С, время отключения которого при к. з. равно 0,6 сек. Величины токов при к. з. в токопроводе составляют:

периодическая составляющая мгновенного тока к. з., равная установившемуся току (затухание отсутствует) 12 ка;

амплитуда мгновенного тока к. з. 22 ка.

Требуется подобрать тип токопровода.

Решение.

По условию нагревания расчетным током можно было бы принять токопровод типа ШРА 60-4 на номинальный ток 400 а, но динамическая устойчивость указанного токопровода недостаточна (табличная данная): 10 ка < 22 ка.

Условию динамической устойчивости отвечает следующий тип токопровода ШРА 60-6 на номинальный ток 600 а, для которого величина допустимой амплитуды тока к. з. составляет 25 ка: 25 ка > 22 ка.

Проверяем токопровод типа ШРА 60-6 на термическую устойчивость по (6-2). По условию примера:

$$I_{\infty} = 12 \text{ кА} = 12000 \text{ А}$$

$$t_{\phi} = t_D = 0,6 \text{ сек}$$

(Фиктивное время принято равным действительному времени отключения к. з., так как затухание тока к. з. отсутствует.)

Величина постоянной C для алюминиевых шин определяется по табл. 6-1:

$$C=90.$$

Минимальное сечение шин токопровода по условиям термической устойчивости при к. з. получается равным:

$$F = 12000 \cdot \frac{\sqrt{0,6}}{90} = 103 \text{ мм}^2$$

Выбранный тип токопровода удовлетворяет условию термической устойчивости, так как сечение шин для него составляет $60 \times 6 = 360 \text{ мм кв} > 103 \text{ мм кв}$.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ НАПЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Пример. Расчетная нагрузка P трехфазной воздушной линии составляет 0,25 МВт, коэффициент мощности для нагрузок сети одинаков и равен $\cos \varphi = 0,96$; $\operatorname{tg} \varphi = 0,29$. Произвести расчет линии 10 кВ (в населенной местности) на потерю напряжения с учетом индуктивности проводов. Материал провода - алюминий. Длина линии $l = 1,8 \text{ км}$.

Допустимая потеря напряжения $\Delta U = 6,5\%$ (см. [табл. 12-6](#)).

Определяем моменты полных и реактивных нагрузок участков линии:

$$M = \sum SI$$

$$\text{где } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{0,25}{0,96} = 0,26 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$M = 0,26 \cdot 1,8 = 0,47 \text{ МВ} \cdot \text{А} \cdot \text{км};$$

$$M_r = \sum Ql,$$

$$M_r = 0,25 \cdot 1,8 \cdot 0,29 = 0,13 \text{ Мвар} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 1$ (см. [табл. 5-12](#)).

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,4 \text{ Ом} / \text{км}$ (см. [табл. 5-13](#)).

Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r,$$

$$\Delta U_a = 6,5 - 1 \cdot 0,4 \cdot 0,13 = 6,45 \text{ } \%$$

Коэффициент $\alpha_1 = 31,6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2$ (см. [табл. 5-9](#)).

Определяем сечение линии

$$F = \alpha_1 \frac{M}{\Delta U}, F = 31,6 \cdot \frac{0,47}{6,45} = 2,3 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее сечение, по условиям механической прочности для ВЛ 10 кВ, равным 35 мм².

Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M}{F}, \Delta U_a = 31,6 \cdot \frac{0,47}{35} = 0,425 \text{ \%}.$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие. На основании методики и алгоритма расчетов составлена табл. 58 выбора сечений для воздушных линий, выполненных алюминиевыми или сталеалюминиевыми проводами в зависимости от длин участков линий и расчетной нагрузки, кВт.

Таблица 58. Расчетное сечение трехфазных воздушных и кабельных линий напряжением 6 и 10 кВ при потере напряжения ΔU до 1,5%; $\cos \varphi = 0,7—1,0$, мм кв.

Нагрузка, кВт	Материал кабеля, марка провода	Длина участка, м																																
		1-400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	4000	5000	7000	10 000		
1000	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16	16 25			25 35			25 50	35 50			35 70		50 70				50 95			70 95				70 120			95 150	120 -	150 -			
	АС	25 25	25 35	25 50			25 70			35 95					50 120				50 150			70 150		70 185					95 240	120 -	150 -	240 -		
	А	35 35	35 50				35 70			35 95					50 120				50 150			70 150		70 185					95 -	120 -	150 -			
630	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16				16 25				16 35	25 35			25 50			35 50				35 70				50 70				70 95	70 120	95 150	150 -		
	АС	25 25			25 35			25 50				25 70					35 70	35 95						35 120	50 120				70 150	70 185	95 -	150 -		
	А	35 35						35 50				35 70						35 95						35 120	50 120				70 150	70 185	95 -	150 -		
400	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16								16 25						16 35	25 35							25 50				35 50	35 70	50 120	70 150	150 240		
	АС	25 25							25 35				25 50							25 70								35 95	50 120	70 185	95 240			
	А	35 35										35 50								35 70								35 95	50 120	70 185	95 240			
250	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16															16 25										16 35		25 50	50 70	70 150	150 240		
	АС	25 25														25 35							25 50						25 70	35 95	50 120	70 150		
	А	35 35																					35 50						35 70	50 120	70 150			
200	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16																			16 25								25 35	35 50	50 70			
	АС	25 25																		25 35									25 50	35 70	50 120			
	А	35 35																											35 50	35 70	50 120			
160	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16																									16 25			25 35	35 50	50 70		
	АС	25 25																							25 35				25 50	35 70	50 120			
	А	35 35																											35 50	35 70	50 120			
100	Кабели с алюминиевыми жилами	16 16																												16 25	25 35	35 50		
	АС	25 25																												25 35	35 50	50 70		
	А	35 35																												35 50	35 70	50 120		

- Примечание. 1. Расчетная потеря напряжения ΔU до 2,5% принята для кабелей с алюминиевыми жилами напряжением 6 кВ.
 2. В числителе указано сечение при напряжении 10, в знаменателе - 6 кВ.

7. КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Сечение кабельной линии рассчитывают по заданной (допустимой) величине потери напряжения с учетом индуктивности линии.

Пример. Расчетная нагрузка P трехфазной кабельной линии составляет 0,4 МВт, коэффициент мощности для нагрузок сети одинаков и равен $\cos \varphi = 0,96$; $\operatorname{tg} \varphi = 0,29$. Произвести расчет кабельной линии напряжением 10 кВ на потерю, напряжения с учетом индуктивных сопротивлений (кабель с алюминиевыми жилами). Длина линии $l = 2 \text{ км}$. Допустимая потеря напряжения $\Delta U = 7\%$.
 Определяем моменты полных и реактивных нагрузок участков линии:

$$M = \sum SI,$$

$$\text{где } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{0,4}{0,96} = 0,41 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$M = 0,41 \cdot 2 = 0,82 \text{ МВ} \cdot \text{А} \cdot \text{км};$$

$$M_r = \sum Ql$$

$$M_r = 0,4 \cdot 0,29 \cdot 2,0 = 0,232 \text{ Мвва} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 1$.

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,08 \text{ Ом} / \text{км}$.

Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r,$$

$$\Delta U_a = 7,0 - 1 \cdot 0,08 \cdot 0,232 = 6,8 \text{ } \%$$

Коэффициент $\alpha_1 = 31,6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2$.

Определяем сечение линии

$$F = \alpha_1 \frac{M}{\Delta U}, F = 31,6 \cdot \frac{0,82}{6,8} = 3,8 \text{ мм}^2$$

Принимаем ближайшее сечение, по допустимым токовым нагрузкам, равным 16 мм².
 Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M}{F}, \Delta U_a = 31,6 \cdot \frac{0,82}{16} = 1,62 \text{ } \%$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие.

8. ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 кВ

Сечение проводов линии рассчитывают по заданной (допустимой) величине потери напряжения с учетом индуктивности линии.

Пример. Расчетная нагрузка P воздушной трехфазной линии составляет 0,63 МВт, коэффициент мощности для нагрузок сети одинаков и равен $\cos \varphi = 0,95$; $\operatorname{tg} \varphi = 0,32$. Произвести расчет воздушной линии 6 кВ (в населенной местности) на потерю напряжения с учетом индуктивности проводов. Материал провода - алюминий. Длина линии $l = 2,1$ км. Допустимая потеря напряжения $\Delta U = 6,5\%$. Определяем моменты полных и реактивных нагрузок участков линии:

$$M = \sum SI,$$

$$\text{где } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{0,63}{0,95} = 0,664 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$M = 0,664 \cdot 2,1 = 1,33 \text{ МВ} \cdot \text{А} \cdot \text{км};$$

$$M_r = \sum Ql,$$

$$M_r = 0,63 \cdot 0,32 \cdot 2,1 = 0,424 \text{ Мвар} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 2,78$.

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,4 \text{ Ом} / \text{км}$.

Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r,$$

$$\Delta U_a = 6,5 - 2,78 \cdot 0,4 \cdot 0,424 = 6,03 \text{ } \%$$

Коэффициент $\alpha_1 = 87,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2$.

Минимальное сечение линии

$$F = \alpha_1 \frac{M}{\Delta U}, \quad F = 87,5 \cdot \frac{1,39}{6,03} = 20,2 \text{ мм}^2$$

Принимаем ближайшее сечение, по условиям механической прочности для ВЛ 6 кВ, равным 35 мм².

Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M}{F}, \quad \Delta U_a = 87,5 \cdot \frac{1,39}{35} = 3,48 \text{ } \%$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие. Для снижения потери напряжения до 1,5% (величина, принятая в расчетах) сечение провода принимается равным 95 мм²

$$\Delta U_a = 87,5 \cdot \frac{1,32}{95} = 1,28 \text{ } \%$$

9. КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 кВ

Рассчитаем сечение кабельной линии по заданной (допустимой) величине потери напряжения с учетом индуктивности линии.

Пример. Расчетная нагрузка P трехфазной кабельной линии составляет 1,0 МВт,

коэффициент мощности для нагрузок сети одинаков и равен $\cos \varphi = 0,95$; $\operatorname{tg} \varphi = 0,32$.

Произвести расчет кабельной линии напряжением 6 кВ на потерю напряжения с учетом индуктивных сопротивлений. Кабель с алюминиевыми жилами. Длина линии $l = 2,4$ км.

Допустимая потеря напряжения $\Delta U = 7\%$.

Определяем моменты полных и реактивных нагрузок участков линии:

$$M = \sum SI,$$

$$\text{где } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1,0}{0,95} = 1,05 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$M = 1,05 \cdot 2,4 = 2,52 \text{ МВ} \cdot \text{А} \cdot \text{км};$$

$$M_r = \sum Ql$$

$$M_r = 1,0 \cdot 0,32 \cdot 2,4 = 0,77 \text{ Мвар} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 2,78$.

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,08 \text{ Ом} / \text{км}$.

Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r, \Delta U_a = 7,0 - 2,78 \cdot 0,08 \cdot 0,77 = 6,8 \text{ } \%$$

Коэффициент $\alpha_1 = 87,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2$.

Сечение жил кабеля

$$F = \alpha_1 \frac{M}{\Delta U}, F = 87,5 \cdot \frac{2,52}{6,8} = 32,4 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее сечение, по условию допустимой токовой нагрузки, равным 35 мм². Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M}{F}, \Delta U_a = 87,5 \cdot \frac{2,52}{35} = 6,3 \text{ } \%$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие. Для снижения потери напряжения до 2,5% (величина, принятая в расчетах) сечение жил кабельной линии принимается равным 95 мм²

$$\Delta U_a = 87,5 \cdot \frac{2,52}{95} = 2,32 \text{ } \%$$

10. ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Сечение провода воздушной линии определяют по заданной потере напряжения с учетом индуктивности линии.

Пример. Расчетная активная нагрузка $P = 20$ кВт, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,96$; $\tan \varphi = 0,29$. Произвести расчет воздушной линии напряжением 0,4 кВ на потери напряжения с учетом индуктивности сопротивлений. Длина линии $l = 280$ м. Материал провода - алюминий. Принимаем допустимые отклонения напряжения - 2,5%. Определяем моменты активных и реактивных нагрузок участка линии:

$$M_a = \sum Pl, \quad M_a = 20 \cdot 0,28 = 5,6 \text{ кВт} \cdot \text{км};$$
$$M_r = \sum Ql, \quad M_r = 20 \cdot 0,28 \cdot 0,29 = 1,63 \text{ квар} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 0,69$.

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,3 \text{ Ом} / \text{км}$.
Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r,$$
$$\Delta U_a = 2,5 - 0,69 \cdot 0,3 \cdot 1,63 = 2,16 \text{ \%}.$$

Коэффициент $\alpha_1 = 21,9$.

Определяем сечение провода

$$F = \alpha_1 \frac{M_a}{\Delta U_a}, \quad F = 21,9 \cdot \frac{5,6}{2,16} = 56,8 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее сечение, по условию механической прочности и допустимой токовой нагрузки, равным 70 мм².

Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M_a}{F}, \quad \Delta U_a = 21,9 \cdot \frac{5,6}{70} = 1,75 \text{ \%}.$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие.

11. КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Сечение кабельной линии определяют по заданной потере напряжения с учетом индуктивности линии.

Пример. Расчетная активная нагрузка P трехфазной кабельной линии составляет 45 кВт, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,96$; $\sin \varphi = 0,28$; $\tan \varphi = 0,29$. Произвести расчет кабельной линии напряжением 0,4 кВ на потерю напряжения с учетом индуктивности сопротивлений. Длина линии $l = 400$ м. Кабель с алюминиевыми жилами. Принимаем допустимые отклонения напряжения - 2,5%.

Определяем моменты полных и реактивных нагрузок участка линии:

$$M_a = \sum Pl, \quad M_a = 45 \cdot 0,4 = 18,0 \text{ кВт} \cdot \text{км};$$

$$M_r = \sum Ql, \quad M_r = 45 \cdot 0,4 \cdot 0,29 = 5,22 \text{ квар} \cdot \text{км}.$$

Коэффициент $\alpha_2 = 0,69$.

Среднее индуктивное сопротивление $x_{cp} = 0,06 \text{ Ом} / \text{км}$.

Определяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \Delta U - \alpha_2 x_{cp} M_r,$$

$$\Delta U_a = 2,5 - 0,69 \cdot 0,06 \cdot 5,22 = 2,3 \text{ \%}.$$

Коэффициент $\alpha_1 = 21,9$.

Определяем сечение жил кабеля

$$F = \alpha_1 \frac{M_a}{\Delta U_a}, \quad F = 21,9 \cdot \frac{18,0}{2,35} = 168 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее сечение (не ниже табличных данных) равным 185 мм².

Проверяем расчетную величину потери напряжения

$$\Delta U_a = \alpha_1 \frac{M_a}{F}, \quad \Delta U_a = 21,9 \cdot \frac{18,0}{185} \approx 2,1 \text{ \%}.$$

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие.

12. ЛИНИИ ДЛЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Пример. Расчетная нагрузка магистрали, питающей осветительную сеть, $P = 30 \text{ кВт}$.

Расчетное значение ΔU_{ϵ} (располагаемая потеря напряжения, проц., от номинального напряжения приемников при коэффициенте загрузки, трансформатора $\beta = 0,9$ мощностью 400 кВА и при $\cos \varphi = 0,96$) равно 4,6%, что при напряжении трехфазной сети у ламп $U = 380/220 \text{ В}$ даст допустимое снижение напряжения - 2,5% от номинального напряжения U ламп. Принимаем расчетный предел отклонения напряжения у ламп рабочего освещения $\Delta U = 1,8\%$. Сеть трехфазная с нулем напряжением 380/220 В. Провода с алюминиевыми жилами, проложенными в трубе. Длина линии $l = 25 \text{ м}$. Определить сечение проводов линии.

Определяем момент нагрузки

$$M = Pl, \quad M = 30 \cdot 25 = 750 \text{ кВт} \cdot \text{м}.$$

По [табл. 12-9](#) находим коэффициент $C=44$.

Определим сечение проводов трехфазной сети освещения с нулевым проводом

$$F = \frac{M}{C \Delta U}, \quad F = \frac{750}{44 \cdot 1,8} = 9,5 \text{ мм}^2.$$

Проверяя результат по [табл. 12-11](#), находим сумму моментов нагрузки ($M = 750 \text{ кВт} \cdot \text{м}$) и при заданной потере напряжения $\Delta U = 1,8\%$ находим $F = 10 \text{ мм}^2$ (в табл. 12-11 ближайшее значение $M = 792 \text{ кВт} \cdot \text{м}$).

Проверочный расчет показывает, что принятое сечение удовлетворяет расчетное условие. Аналогично выполняют расчет для однофазной двухпроводной сети освещения и для трехпроводной сети (две фазы с нулевым проводом), при которых соответственно меняются коэффициенты C и a (при ответвлениях, см табл. [12-10](#)).

13. СМЕШАННЫЕ СИЛОВЫЕ И ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Пример. Расчетная мощность трехфазной сети напряжением 380 В выполнена кабелем с алюминиевыми жилами (силовая и осветительная сеть): $P = 10 \text{ кВт}$; $\cos \varphi = 0,9$; $\tan \varphi = 0,485$; $l = 0,015 \text{ км}$. Помещение взрывоопасное - В-1б. Определяем сумму реактивных нагрузок

$$\sum Q = P \tan \varphi = 10 \cdot 0,485 = 4,85 \text{ квар.}$$

Определяем нагрузку участка сети

$$S = \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} = \sqrt{10^2 + 4,85^2} = 11,1 \text{ кВА.}$$

Сила тока в линии

$$I = \frac{S 10^3}{\sqrt{3} U_{\text{л}}} = \frac{11,1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 16,8 \text{ А}$$

По условию допустимой токовой нагрузки принимаем сечение жилы равным 4 мм².

Потеря напряжения в линии $\Delta U_c = k I l = 3,23 \cdot 16,8 \cdot 0,015 = 0,81 \%$.

По таблице коэффициент потери напряжения $k = 3,23$.

Полученный результат $\Delta U_c = 0,81 \%$ проверяем по табличным данным потери напряжения от номинального напряжения приемников.

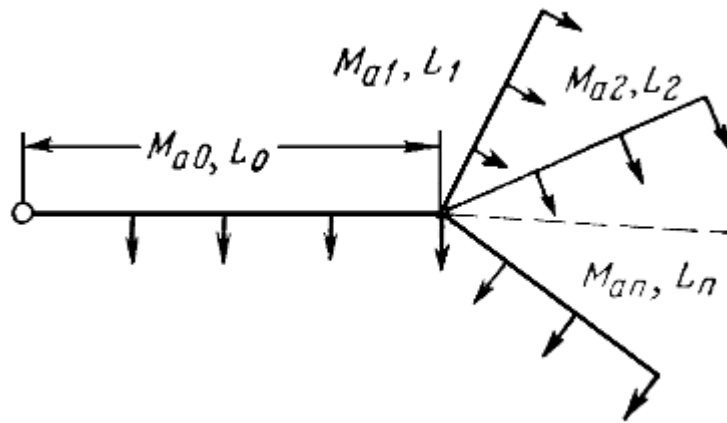
14. Расчет сети по условию наименьшей затраты металла

Для магистральной линии с ответвлениями на конце (рис 5-4) сечение проводов магистрали по условию наименьшей затраты металла определяется по формуле

$$F_0 = \alpha_1 \frac{M_{\text{ас}}}{\Delta U_a} \left(1 + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{а}} L}{M_{\text{ас}} L}} \right) \quad (5-18)$$

где α_1 - коэффициент по табл. [5-9](#)

Рисунок 5-4 Схема магистрали с ответвлениями на конце.



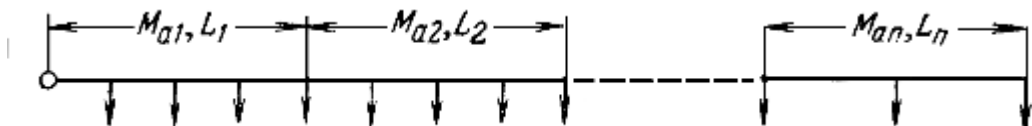
M_{a0} - сумма произведений активных нагрузок на длины участков магистрали;

L_0 - длина магистрали;

ΔU_a - допустимая потеря напряжения в линии с активными нагрузками;

$\sum_1^n M_a L$ - сумма произведений значений M_a на длину ответвления, подсчитанная для всех ответвлений.

Рисунок 5-5. Схема магистрали, выполненной из нескольких участков различных сечений.



Полученное по (5-18) сечение магистрали округляется до ближайшего (большого или меньшего) стандартного сечения провода.

Определение сечений проводов для ответвлений производится по [формулам](#).

Для магистральной линии, разделенной по длине на несколько участков (рис. 5-5), сечение первого участка определяется по формуле

$$F_1 = \alpha_1 \frac{M_{a1}}{\Delta U_a} \cdot \frac{\sum_1^n M_a L}{\sqrt{M_{a1} L_1}} \quad (5-19)$$

где α_1 - коэффициент, определяемый по табл. [5-9](#);

M_{a1} - значение M_a для первого участка;

L_1 - длина первого участка;

ΔU_a - допустимая потеря напряжения для всей длины с активными нагрузками.

Полученное по (5-19) сечение проводов первого участка округляется до ближайшего (большого или меньшего) стандартного сечения.

Сечение проводов второго участка определяется по формуле

$$F_2 = \alpha_1 \frac{M_{a2}}{\Delta U_a - \Delta U_{a1}} \cdot \frac{\sum_2^n \sqrt{M_a L}}{M_{a2} L_2} \quad (5-20)$$

в которой индексами 1 и 2 отмечены величины, относящиеся соответственно к первому и второму участкам линии.

Сечения проводов последующих участков определяются аналогично.

Сечение проводов последнего участка округляется в сторону большего номинального сечения.

В случаях расчета линий с учетом индуктивности проводов величины ΔU_a , ΔU_{a1} , ΔU_{a2} и т. д. в (5-18), (5-19) и (5-20) определяются по (5-10).

Пример 5-6

Рассчитать по потере напряжения и условию наименьшей затраты металла линию из примера 5-2.

Решение.

По данным примера 5-2 имеем:

$$\Delta U = 6,5\%; \quad \Delta U_a = 4,4\%; \quad \alpha_1 = 87,5 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кв}^2$$

$$M_{ao} = M_{aAB} = 1,97 \text{ Мвт} \cdot \text{км}; \quad L_o = 2 \text{ км}$$

$$M_{a1} = M_{aBB} = 0,765 \text{ Мвт} \cdot \text{км}; \quad L_1 = 9 \text{ км}$$

$$M_{a2} = M_{aBG} = 1,08 \text{ Мвт} \cdot \text{км}; \quad L_2 = 4 \text{ км}$$

$$M_{a3} = M_{aBD} = 0,92 \text{ Мвт} \cdot \text{км}; \quad L_3 = 6 \text{ км}$$

откуда определяем сечение магистрали АБ по (5-18):

$$F_o = 87,5 \frac{1,97}{4,4} \left(1 + \sqrt{\frac{0,765 \cdot 9 + 1,08 \cdot 4 + 0,92 \cdot 6}{1,97 \cdot 2}} \right) = 119 \text{ мм}^2 \quad (120 \text{ мм}^2)$$

Дальнейший расчет производим по данным табл. 5-22.

Потеря напряжения в магистрали

$$\Delta U_{AB} = \Delta U_o = 1,39 \cdot 1,97 = 2,74\%$$

Потеря напряжения, допустимая при расчете ответвления из точки Б

$$\Delta U_B = 6,5 - 2,74 = 3,76\%$$

Расчет ответвлений:

ответвление БВ

$$\Delta U_{TБ} \leq \frac{3,76}{0,765} = 4,92\% \text{ (провод А25)}$$

ответвление БГ

$$\Delta U_{TБ} \leq \frac{3,76}{1,08} = 3,48\% \text{ (провод А35)}$$

ответвление БД

$$\Delta U_{TБ} \leq \frac{3,76}{0,92} = 4,1\% \text{ (провод А35)}$$

Здесь $\Delta U_{TБ}$ - табличное значение величины потери напряжения.

Вес проводов линии по расчету примера 5-2 (см. таблицу)

$$G_1 = 3(191 \cdot 2 + 95 \cdot 9 + 136 \cdot 4 + 136 \cdot 6) = 7791 \text{ кг}$$

Вес проводов по расчету на минимум металла

$$G_2 = 3(322 \cdot 2 + 68 \cdot 9 + 95 \cdot 4 + 95 \cdot 6) = 6618 \text{ кг}$$

Экономия в весе проводов при расчете на минимум металла

$$7791 - 6618 = 1173 \text{ кг (15\%)}$$

15. Расчет сети по условию постоянной плотности тока

Сечения проводов отдельных участков сети при расчете по потере напряжения по условию постоянной плотности тока определяются по формулам:

$$F_1 = \frac{I_1}{j}; \quad F_2 = \frac{I_2}{j} \quad (5-21)$$

где I_1, I_2 - токи участков линии, а;

j - плотность тока, постоянная для всех участков линии:

$$j = \frac{\gamma \Delta U_a}{\sqrt{3} \sum l \cos \varphi} \quad (5-22)$$

γ - удельная проводимость провода, м/ом мм²;

ΔU_a - допустимая потеря напряжения в линии с активными нагрузками.

При расчете линии с учетом индуктивности ΔU_a определяется по формуле (5-10).

$\sum l \cos \varphi$ - сумма произведений длины каждого из участков в метрах на коэффициент мощности - подсчитывается от начала линии до конца того ответвления, для которого эта сумма получается наибольшей.

При одинаковом $\cos \varphi$ для всех нагрузок линии плотность тока определяется по формуле

$$j = \frac{\gamma \Delta U_a}{\sqrt{3} L \cos \varphi} \quad (5-23)$$

где L - общая длина, равная длине магистрали и наибольшей длине ответвления, м.

Подсчитанные по (5-21) сечения проводов округляются до ближайшего номинального сечения, после чего производится поверочный расчет линии на величину потери напряжения.

16. Проверка условий срабатывания защитного аппарата при однофазном замыкании в сетях напряжением до 1000В с глухим заземлением нейтрали

В электрических сетях напряжением до 1000 в с глухим заземлением нейтрали должно быть обеспечено надежное отключение защитным аппаратом однофазного к. з. Это диктуется требованиями техники безопасности.

Расчетными точками для определения величины тока к. з. являются наиболее удаленные (в электрическом смысле) точки сети, так как именно этим точкам соответствует наименьшее значение тока однофазного к. з.

Величина однофазного тока к. з. может быть определена по приближенной формуле

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_T + Z_\Pi} \quad (7-1)$$

где U_ϕ - фазное напряжение сети, в;

Z_T - полное сопротивление понижающего трансформатора току замыкания на корпус, ом;

Z_Π - полное сопротивление петли фаза - нуль линии до наиболее удаленной точки сети, ом.

Расчетные значения полных сопротивлений понижающих трансформаторов при однофазных замыканиях приведены в табл. 7-1.

Для трансформаторов мощностью более 630 кВА при определении тока к. з. можно принять:

$$Z_T = 0$$

Полное сопротивление петли проводов или жил кабеля линии определяется по формуле

$$Z_\Pi = \sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2} \quad (7-2)$$

где R_Π - активное сопротивление фазного (R_ϕ) и нулевого (R_o) проводов, ом;

$$R_\Pi = R_\phi + R_o \quad (7-3)$$

X_Π - индуктивное сопротивление петли проводов или жил кабеля, ом.

Активные сопротивления проводов из цветных металлов определяются по [табл. 5-1](#).

Средние значения индуктивных сопротивлений петель проводов или жил кабелей из цветных металлов на 1 км линии даны в табл. 7-2.

Для стальных проводов индуктивное сопротивление петли проводов определяется по формуле

$$X_\Pi = X'_{\Pi} + X''_{\Pi.л} + X''_{\Pi.о} \quad (7-4)$$

где X'_{Π} - внешнее индуктивное сопротивление петли из прямого и обратного проводов, равное для воздушной линии напряжением до 1000В 0,6 ом/км; $X''_{\Pi.л}$ и $X''_{\Pi.о}$ - внутренние индуктивные сопротивления соответственно прямого и обратного проводов линии, ом/км. Значения полных сопротивлений петель для проводов и жил кабелей из цветных металлов на 1 км линии даны в табл. 7-3. В табл. 7-6 указаны сопротивления петли "фаза трехжильного кабеля - стальная полоса" для небронированных кабелей.

Таблица 7-1 Расчетные сопротивления трансформаторов при однофазном к. з. на стороне 400/230 В

Тип	Номинальная мощность, кВА	Напряжение обмотки ВН, кВ	Схема соединений	Полное сопротивление Z_T , ом
-----	---------------------------	---------------------------	------------------	---------------------------------

ГОСТ401-41				
TM,	20	6-10	У/У _Н	1,39
TMA	30	6-10	У/У _Н	0,9
TM	50	6-10	У/У _Н	0,54
TM	100	6-10	У/У _Н	0,27
TM	100	35	У/У _Н	0,25
TMA	100	6-10	У/У _Н	0,26
TCMA	100	35	У/У _Н	0,25
TCM	180	6-10	У/У _Н	0,15
TM,	180	35	У/У _Н	0,14
TMA	320	6-10	У/У _Н	0,085
TM,	320	35	У/У _Н	0,08
TMA	560	6-10	У/У _Н	0,048
TM.	560	35	У/У _Н	0,046
TMA	750	6-10	У/У _Н	0,036
TM,	1000	6-10	У/У _Н	0,027
TMA	1000	35	У/У _Н	0,026
TM,				
TMA				
TM,				
TMA				
TM,				
TMA				
TM,				
TMA				
TM				
ГОСТ12022-66				
TM	25	6-10	У/У _Н	1,04
TM	40	6-10	У/У _Н	0,65
TM	63	6-10	У/У _Н	0,413
TM	63	20	У/У _Н	0,38
TM	100	6-10	У/У _Н	0,26
TM	100	20-35	У/У _Н	0,253
TM	160	6-10	У/У _Н	0,162
TM	160	20-35	У/У _Н	0,159
TM	250	6-10	У/У _Н	0,104
TM	250	20-35	У/У _Н	0,102
TM	400	6-10	У/У _Н	0,065
TM	400	20-35	У/У _Н	0,064
TM	400	6-10	Д/У _Н	0,022
TM	630	6-10	У/У _Н	0,043
ГОСТ11920-66				
TM	1 000	6-10	У/У _Н	0,027
TM	1 000	20-35	У/У _Н	0,026
TM	1 000	6-10	Д/У _Н	0,009
TM	1 000	20-35	Д/У _Н	0,01
-				
TC3	160	6-10	Д/У _Н	0,055
TC3	180	6-10	У/У _Н	0,15
TC3	250	6-10	Д/У _Н	0,035
TC3	320	6-10	У/У _Н	0,085
TC3	400	6-10	Д/У _Н	0,022
TC3	560	6-10	У/У _Н	0,048
TC3	630	6-10	Д/У _Н	0,014
TC3	750	6-10	У/У _Н	0,036
TC3	1 000	6-10	Д/У _Н	0,009
TC3	1 000	6-10	У/У _Н	0,027

Примечания: Для понижающих трансформаторов с напряжением вторичных обмоток 230/133в значения сопротивлений в 3 раза меньше указанных в табл. 7-1.

Условные обозначения схем соединений трансформаторов:

У - звезда; Ун - звезда с выведенной нулевой точкой; Д - треугольник.

Таблица 7-2 Средние значения индуктивных сопротивлений петли прямого и обратного проводов или жил кабеля, выполненного из цветных металлов ом/км

Условия прокладки	Индуктивные сопротивления
Кабель до 1 кв или провода, проложенные в трубах	0,15
Изолированные провода на роликах	0,4
Провода на изоляторах внутри помещений или по наружным стенам здания	0,5
Воздушные линии низкого напряжения	0,6

Таблица 7-3 Полные сопротивления петли прямого и обратного провода линии или жил кабеля, ом/км

Сечение провода, мм.кв		Кабель и провода в трубах		Провода на роликах и изоляторах		Провода воздушных линий	
прямого	обратного	медные	алюминиевые	медные	алюминиевые	медные	алюминиевые
1	1	37,8	-	-	-	-	-
1,5	1	31,5	-	-	-	-	-
1,5	1,5	25,2	-	25,2	-	-	-
2,5	1,5	20,2	-	20,2	-	-	-
2,5	2,5	15,1	25,2	15,1	25,2	-	-
4	1,5	17,3	-	17,3	-	-	-
4	2,5	12,2	20,5	12,2	20,5	-	-
4	4	9,3	15,8	9,3	15,8	9,3	-
6	2,5	10,6	17,9	10,6	17,9	-	-
6	4	7,71	13,2	7,71	13,2	-	-
6	6	6,12	10,5	6,14	10,5	6,16	-
10	4	6,50	11,1	6,52	11,1	-	-
10	6	4,90	8,42	4,92	8,42	4,96	-
10	10	3,68	6,32	3,71	6,32	3,75	-
16	6	4,26	7,24	4,28	7,24	4,32	-
16	10	3,04	5,14	3,08	5,15	3,13	-
16	16	2,40	3,96	2,45	3,99	2,52	4,03
25	10	2,58	4,44	2,62	4,46	2,69	4,50
25	16	1,94	3,26	1,98	3,30	2,08	3,34
25	25	1,49	2,56	1,55	2,60	1,68	2,66
35	10	2,38	4,08	2,42	4,11	2,48	4,15
35	16	1,74	2,90	1,79	2,96	1,87	3,00
35	35	1,09	1,84	1,16	1,90	1,29	1,96
50	16	1,60	2,62	1,65	2,66	1,74	2,70
50	25	1,14	1,92	1,21	1,97	1,32	2,03
50	50	0,793	1,29	0,890	1,36	1,05	1,44
70	25	1,03	1,74	1,11	1,80	1,24	1,86
70	35	0,833	1,39	0,927	1,45	1,08	1,53
70	70	0,58	0,932	0,706	1,03	0,896	1,13
95	35	0,755	1,27	856	1,34	1,02	1,42
95	50	0,608	0,99	0,712	1,08	0,915	1,18
95	95	0,428	0,797	0,566	0,815	0,772	0,907
120	50	0,568	0,922	-	-	0,858	1,09
120	70	0,461	0,745	-	-	0,792	0,945
120	120	0,350	0,561	-	-	0,732	0,808
150	50	0,535	0,862	-	-	-	1,04
150	70	0,430	0,687	-	-	-	0,808

150	150	0,285	0,446	-	-	-	0,732
-----	-----	-------	-------	---	---	---	-------

Таблица 7-6 Полные сопротивления петли "фаза трех жильного кабеля - стальная полоса", Ом/км

Сечение кабеля, мм.кв	Ток и материал жил кабеля	Размеры стальной полосы, мм											
		20X4		40X4		50X4	50X4	60X4		80X4		100X4, 100X6	100X5, 100X8
	Ток срабатывания максимального расцепителя автомата, а	150	1400	200	1400	250	1400	300	1400	400	1400	500	1400
	Номинальный ток плавкой вставки безынартционного предохранителя, а	60	600	80	600	100	600	120	600	150	600	200	600
	Материал жил кабеля:	Полное сопротивление петли, ом/км											
3X4	Медь	9,59	8,42	7,82	7,45	7,40	7,17	7,14	6,92	6,82	6,59	6,56	6,45
	Алюминий	13,52	12,35	11,79	11,42	11,37	11,14	11,13	10,91	10,81	10,58	10,56	10,45
3X6	Медь	7,76	6,59	5,97	6,60	5,54	5,31	5,27	5,05	4,95	4,72	4,68	4,57
	Алюминий	10,34	9,17	8,59	8,22	8,17	7,94	7,92	7,7	7,61	7,38	7,34	7,23
3X10	Медь	6,36	5,19	4,55	4,18	4,11	3,98	3,83	3,61	3,5	3,27	3,22	3,1
	Алюминий	7,86	6,69	6,07	5,7	5,63	5,4	5,37	5,15	5,05	4,82	4,77	4,66
3X16	Медь	5,6	4,43	3,78	3,41	3,32	3,09	3,04	2,82	2,71	2,48	2,42	2,31
	Алюминий	6,49	5,32	4,68	4,31	4,24	3,01	3,96	3,74	3,64	3,41	3,36	3,25
3X25	Медь	5,14	3,97	3,31	2,94	2,86	2,63	2,57	2,35	2,24	2,01	1,95	1,84
	Алюминий	5,70	4,53	3,88	3,51	3,43	3,2	3,15	2,93	2,82	2,59	2,53	2,42
3X35	Медь	4,91	3,74	3,09	2,71	2,64	2,4	2,35	2,13	2,01	1,78	1,73	1,62
	Алюминий	5,30	4,13	3,48	3,11	3,03	2,8	2,74	2,52	2,41	2,18	2,12	2,01
3X50	Медь	4,75	3,58	2,92	2,55	2,47	2,24	2,19	1,97	1,86	1,63	1,57	1,46
	Алюминий	5,02	3,85	3,19	2,72	2,74	2,5	2,45	2,23	2,12	1,89	1,83	1,72
3X70	Медь	4,64	3,47	2,81	2,44	2,37	2,4	2,08	1,86	1,75	1,52	1,46	1,35
	Алюминий	4,83	3,66	3,0	2,63	2,55	2,32	2,26	2,04	1,93	1,7	1,64	1,53
3X95	Медь	4,57	3,40	2,73	2,36	2,29	2,06	2,01	1,79	1,67	1,44	1,38	1,27
	Алюминий	4,70	3,53	2,87	2,50	2,42	2,19	2,14	1,92	1,8	1,57	1,51	1,40
3X120	Медь	4,51	3,34	2,69	2,32	2,24	2,01	1,96	1,74	1,63	1,4	1,35	1,24
	Алюминий	4,62	3,45	2,8	2,43	2,35	2,12	2,07	1,85	1,74	1,51	1,45	1,34
3X150	Медь	4,47	3,30	2,65	2,28	2,21	1,98	1,93	1,71	1,60	1,37	1,31	1,2
	Алюминий	4,56	3,39	2,74	2,37	2,29	2,06	2,01	1,79	1,65	1,47	1,39	1,28
3X185	Медь	4,44	3,27	2,63	2,26	2,18	1,95	1,90	1,68	1,58	1,35	1,28	1,17
	Алюминий	4,52	3,35	2,7	2,33	2,25	2,02	1,96	1,74	1,64	1,41	1,35	1,24

Примечание: Сопротивление петли "фаза кабеля - стальная полоса" не остается постоянным для указанных в таблице значений тока, так как сопротивление стальной полосы зависит от тока. Для промежуточных значений тока величина сопротивления определяется интерполяцией

Надежное отключение защитным аппаратом однофазного к. з. будет обеспечено при условии выполнения соотношения

$$K_{31}I_3 \leq I_k \quad (7-5)$$

где K_{31} - допустимая кратность минимального тока к. з. по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя или току срабатывания, или номинальному току максимального расцепителя автомата I_3 ;

I_k - наименьшая величина однофазного тока к. з., определяемая по формуле (7-1), а.

Допустимая кратность минимального тока к. з. должна быть не менее 3 по отношению к

номинальному току плавкой вставки предохранителя и номинальному току расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратно зависимую от тока характеристику, и не менее $1,1 K_p$ по отношению к току срабатывания автоматического выключателя, имеющего только электромагнитный расцепитель (K_p - коэффициент, учитывающий разброс характеристик расцепителя по данным завода).

Для сетей, прокладываемых во взрывоопасных помещениях, допустимые кратности тока к. з. увеличиваются до значения 4 по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя и 6 по отношению к номинальному току расцепителя автоматического выключателя с обратно зависимой от тока характеристикой.

Для сетей, защищаемых только от токов к. з., в необходимых случаях (например, для отстройки от токов самозапуска двигателей) допускается завышение токов плавких вставок предохранителей и уставок расцепителей автоматов, но при этом кратность тока к. з. должна иметь значение не менее 5 по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя и не менее 1,5 по отношению к току срабатывания электромагнитного расцепителя автомата.

Значения допустимой кратности тока к. з. для различных условий прокладки сети приведены в табл. 7-8.

Таблица 7-8 Значения допустимой минимальной кратности тока к. з. по отношению к току защитного аппарата

Условия прокладки	Допустимая кратность тока к. з. по отношению		
	к номинальному току плавкой вставки предохранителя	к току уставки срабатывания автоматического выключателя, имеющего только электромагнитный расцепитель (отсечку)	к номинальному току расцепителя автоматического выключателя с обратно зависимой от тока характеристикой
Сеть проложена в невзрывоопасном помещении при условии выполнения требований табл. 4-50	3	$1,1 K_p$	3
	5	1,5	-
	4	$1,1 K_p$	6
Сеть проложена в не взрывоопасном помещении при условии, что требования табл. 4-50 не выполняются			
Сеть проложена во взрывоопасном помещении			

Примечания: K_p - коэффициент, учитывающий разброс характеристик автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем. При отсутствии данных завода о гарантируемой точности уставки тока срабатывания автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем (отсечка) допускается принимать значение коэффициента K_p для автоматических выключателей на номинальный ток до 100 а равным 1,4, выше 100 а - равным 1,25. При затруднении в выполнении требований, указанных в табл. 7-8, допускается применение быстродействующей защиты от замыкания на землю.

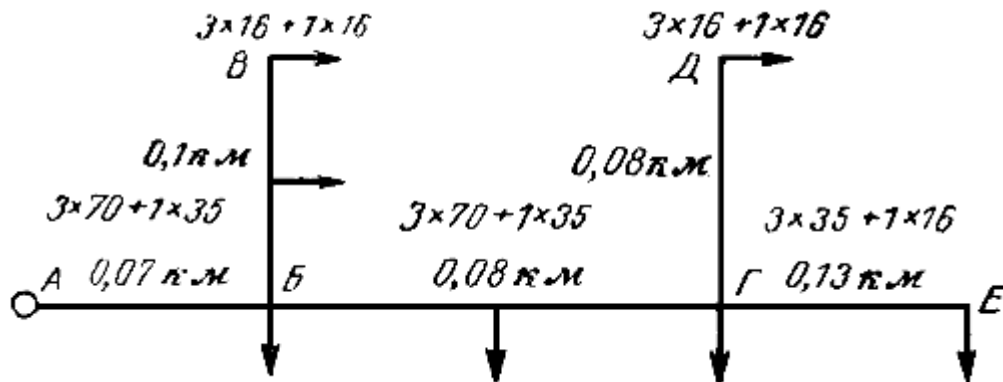
Пример 7-1.

На рис. 7-1 представлена схема четырехпроводной воздушной линии, выполненной алюминиевыми проводами и получающей питание от шин распределительного щита 380/220 в. Нейтраль системы глухо заземлена. Сечения проводов и длины участков линии указаны на рис. 7-1.

Пренебрегая сопротивлением внешней сети до шин щита и сопротивлением трансформатора, проверить действие защитных аппаратов при однофазном к. з. в наиболее удаленных точках линии для следующих вариантов:

1. Линия защищена предохранителями с плавкими вставками на номинальный ток 80 а.
2. Линия защищена автоматическим выключателем типа А 3124 с комбинированными расцепителями на номинальный ток 100 а.
3. Линия защищена автоматическим выключателем типа А 3124 с электромагнитными расцепителями с уставкой тока срабатывания 600 а .

Рис. 7-1. Схема к примеру



Соображения, по которым выбран тот или иной аппарат защиты, здесь не рассматриваются. Пример имеет ограниченную цель - показать типичные случаи проверки защитного отключения при однофазном к.з.

Решение.

Условие срабатывания аппаратов защиты проверяем по формуле (7-5). Определяем сопротивления петли фазного и нулевого проводов линии при однофазном к. з. в такой точке, для которой значение сопротивления будет наибольшим. По табл. 7-3 находим значения удельных сопротивлений петли "фаза - нуль" для сечений участков линии:

$$3 \times 70 + 1 \times 35 \quad Z_n = 1,53 \text{ ом/км};$$

$$3 \times 35 + 1 \times 16 \quad Z_n = 3,0 \text{ ом/км};$$

$$3 \times 16 + 1 \times 16 \quad Z_n = 4,03 \text{ ом/км};$$

Определяем, какая из точек Д или Е является расчетной. Сопротивление петли между точками Г и Д

$$4,03 \times 0,08 = 0,323 \text{ ом};$$

сопротивление петли между точками Г и Е

$$3 \times 0,13 = 0,39 \text{ ом}.$$

Расчетной оказывается точка Е. Полное сопротивление петли "фаза - нуль" между точками А и Е составляет:

$$Z_n = 1,53(0,07+0,08) + 0,39 = 0,62 \text{ ом.}$$

Номинальное фазное напряжение

$$U_n = 220 \text{ в.}$$

Определяем величину однофазного тока при к. з. в наиболее удаленной точке Е сети (по условию примера следует принять $Z_T = 0$):

$$I_k = \frac{220}{0,62} = 355 \text{ а}$$

Проверяем выполнение условия (7-5) для всех трех вариантов защиты линии.

Вариант 1.

Допустимая минимальная кратность тока к. з. по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранителя согласно табл. 7-8 равна:

$$K_{31} = 3.$$

$$\text{Отсюда: } 3 \times 80 = 240 \text{ а} < 355 \text{ а.}$$

Таким образом, надежное действие защищающих линию предохранителей обеспечивается.

Вариант 2.

Допустимая кратность тока к. з. по отношению к тепловому элементу комбинированного расцепителя, имеющему обратно зависящую от тока характеристику, равна:

$$K_{31} = 3.$$

$$\text{Отсюда соотношение (7-5)}$$

$$3 \times 100 = 300 \text{ а} < 355 \text{ а}$$

выполняется.

Вариант 3.

По данным завода гарантируемая точность уставки для автоматических выключателей типа А 3124 составляет $\pm 15\%$. Приняв в соответствии с указанием табл. 7-8 коэффициент запаса равным 1,1, получим:

$$K_{31} = 1,1 \times 1,15 = 1,27;$$

$$1,27 \times 600 = 760 \text{ а} > 355 \text{ а.}$$

Надежность действия автоматического выключателя при к. з. в точке Е не обеспечивается.

Пример 7-2.

В системе с глухо заземленной нейтралью при напряжении 380/220 в линия защищается предохранителями с плавкими вставками на номинальный ток 100 а. Полагая $Z_T = 0$, определить наибольшую длину линии, при которой будет обеспечиваться надежное перегорание предохранителей при однофазном к. з. в конце линии для следующих вариантов выполнения линии:

1. Воздушная линия с алюминиевыми проводами сечением 3 X 50+1 X 25 мм.кв.
2. Трехжильный кабель с алюминиевыми жилами сечением 3X50 мм.кв в алюминиевой оболочке, используемой в качестве заземляющего провода.
3. Трехжильный небронированный кабель с алюминиевыми жилами сечением 3 X 50 мм.кв с заземляющей шиной в виде стальной полосы сечением 50 X 4 мм.

Решение.

По табл. 7-8 определяем минимально допустимую кратность тока к. з.:

$$K_{31} = 3.$$

Наименьшая допустимая величина однофазного тока к. з.

$$I_k = 3 \times 100 = 300 \text{ а.}$$

Учитывая, что по условию примера $Z_T = 0$, находим по формуле (7-1) наибольшее допустимое сопротивление "фаза - нуль" линии:

$$Z_{\Pi} \leq \frac{220}{300} = 0,733 \text{ ом}$$

Определяем удельное сопротивление 1 км петли "фаза - нуль": для варианта 1 по табл. 7-3

$$Z_{\Pi} = 2,03 \text{ ом/км;}$$

для варианта 2

$$Z_{\Pi} = 1,03 \text{ ом/км;}$$

для варианта 3 по табл. 7-6

$$Z_{\Pi} = 2,74 \text{ ом/км.}$$

Наибольшие допустимые длины линии будут равны:

вариант 1

$$l \leq \frac{0,733}{2,03} = 0,36 \text{ км}$$

вариант 2

$$l \leq \frac{0,733}{1,03} = 0,71 \text{ км}$$

вариант 3

$$l \leq \frac{0,733}{2,74} = 0,267 \text{ км}$$

Наибольшая длина линии обеспечивается применением кабеля с использованием алюминиевой оболочки в качестве заземляющего (нулевого) провода.

17. Выбор проводов и кабелей по экономической плотности тока

Установлены экономические плотности тока, по которым должны выбираться сечения проводов воздушных линий и жил кабелей.

Экономическая плотность тока определяется из табл. 8-1.

Сечение проводника по условию экономической плотности тока определяется по формуле

$$F_3 = \frac{I}{j_3}, \text{ мм}^2 \quad (8-1)$$

где I - расчетный ток линии, а;

j_3 - экономическая плотность тока, а/мм кв., принимаемая по табл. 8-1.

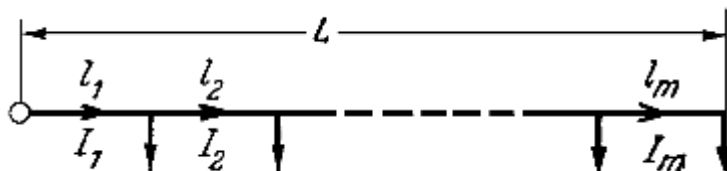
Расчетный ток линии принимается из условий нормальной работы и при определении его не учитывается увеличение тока в линии при авариях или ремонтах в каких-либо элементах сети.

Полученное по (8-1) сечение проводника округляется до ближайшего стандартного сечения.

При пользовании табл. 8-1 необходимо руководствоваться следующим:

1. При максимуме токовой нагрузки в ночное время экономическая плотность тока повышается на 40%.
2. Для изолированных проводов сечением 16 мм кв. и менее экономические плотности тока увеличиваются на 40%.
3. Для линий с одинаковым сечением проводников по всей длине и различными нагрузками на отдельных участках их (рис. 8-1)

Рис. 8-1. Схема линии с различными токовыми нагрузками участков



Экономическая плотность тока для начального участка увеличивается по сравнению с величинами, указанными в табл. 8-1, в K_y раз; при этом коэффициент увеличения определяется по формуле

$$K_y = \sqrt{\frac{I_1^2 L}{I_1^2 l_1 + I_2^2 l_2 + \dots + I_m^2 l_m}} \quad (8-2)$$

где I_1, I_2, \dots, I_m - токовые нагрузки отдельных участков линии;

l_1, l_2, \dots, l_m - длины тех же участков линии;

L - полная длина линии.

4. При выборе сечений проводников для питания ряда однотипных взаимно резервируемых электроприемников (например, насосов водоснабжения, преобразовательных агрегатов и т. п.) общим числом n , если известно, что все они одновременно не включаются и n_1 из них поочередно находятся в работе, экономическая плотность должна быть увеличена против норм табл. 8-1 умножением на коэффициент

$$K_{y1} = \sqrt{\frac{n}{n_1}} \quad (8-3)$$

Таблица 8-1 Предельная экономическая плотность тока, а/мм кв

Наименования проводников	Продолжительность использования максимума нагрузки, ч		
	1000-3000	3000-5000	более 5000
Голые провода и шины:			
медные	2,5	2,1	1,8
алюминиевые	1,3	1,1	1,0
Кабели с бумажной и провода с резиновой изоляцией с жилами;			
медными	3,0	2,5	2,0
алюминиевыми	1,6	1,4	1,2
Кабели с резиновой и			

пластмассовой изоляцией с жилами: медными алюминиевыми	3,5 1,9	3,1 1,7	2,7 1,6
--	------------	------------	------------

Целесообразность увеличения числа линий или цепей сверх необходимого по условиям надежности электроснабжения, а также замены существующих проводов проводами больших сечений при росте нагрузки в целях удовлетворения условий экономической плотности тока должна обосновываться только на основании технико-экономических расчетов.

Проверке по экономической плотности тока не подлежат:

- 1) Сети промышленных предприятий и сооружений напряжением до 1000 в при числе часов использования максимума нагрузки предприятия до 4000-5000;
- 2) все ответвления к отдельным электроприемникам напряжением до 1000 в, а также осветительные сети на промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, проверенные по потере напряжения;
- 3) сети временных сооружений, а также устройств с малым сроком службы (3-5 лет);
- 4) сборные шины;
- 5) проводники, идущие к сопротивлениям, пусковым реостатам и т. п.

Для определения среднего числа часов использования максимума нагрузки при отсутствии уточненных данных можно пользоваться приведенными в табл. 8-2 ориентировочными данными как по категориям потребителей, так и по различным основным отраслям промышленности.

В табл. 8-3 приведены значения тока в линии, обеспечивающего наибольшую экономичность эксплуатации в зависимости от материала и сечения проводов и жил кабелей и годового числа часов использования максимальной нагрузки.

Пример 8-1.

Требуется выбрать по экономической плотности тока сечение кабеля 6 кв с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами для питания деревообделочного завода с максимальной токовой нагрузкой 54 а.

Решение.

По табл. 8-2 находим среднее число часов использования максимума нагрузки для деревообрабатывающей промышленности: $T=2500$ ч.

В графе табл. 8-3, соответствующей числу часов использования менее 3000 для кабелей с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами, определяем, что экономическая плотность тока будет обеспечена при кабеле сечением 3 X 35 мм кв.

Пример 8-2.

На рис. 8-2 представлена схема воздушной линии городской электросети 380/220 в, выполненной алюминиевыми проводами с одинаковым сечением по всей длине линии. Требуется выбрать сечение проводов, соответствующее экономической плотности тока, при числе часов использования максимума менее 3000.

Таблица 8-2 Среднее число часов использования максимальной нагрузки для различных категорий потребителей и отраслей промышленности

Потребители	T, ч
По категориям потребителей	
Внутреннее освещение городов	1 500-2 500
Наружное освещение городов	2 000-3 600
Промышленные предприятия, работающие:	
1) в одну смену	2 000-3 000
2) в две смены	3 000-4 500
3) в три смены	4 500-7 000
По отраслям промышленности	
Металлургическая	6 500
Химическая	6 200
Горнорудная	5 000
Машиностроительная	4 000
Бумажная	5 500
Пищевая	5 000
Полиграфическая	3 000
Текстильная	4 500
Обувная	3 000
Деревообрабатывающая	2 500
Холодильная	4 000

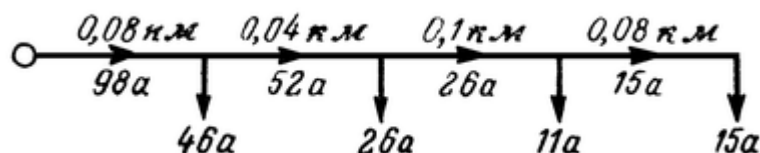


Рис. 8-2

Таблица 8-3 Экономические токи для неизолированных проводов и кабелей, а

Марки и сечения проводов и кабелей	Экономический ток, а, при числе часов использования максимума в год		
	более 5000	3000-5000	менее 3000
Неизолированные провода			
A-16	16	18	21
A-25	25	27	32
A-35	35	38	45
A-50	50	55	65
A-70	70	77	91
A-95	95	104	123
A-120	120	132	156
A-150	150	165	195
M-6	11	13	15
M-10	18	21	25
M-16	29	34	40

M-25	45	53	63
M-35	63	73	87
M-50	90	104	125
M-70	126	146	174
M-95	170	199	237
M-120	216	252	300
M-150	271	316	376
Трехжильные кабели с бумажной изоляцией С медными жилами			
3X10	20	25	30
3X16	32	40	48
3X25	50	62	75
3X35	70	87	105
3X50	100	125	150
3X70	140	175	210
3X95	190	237	285
3X120	240	300	360
3X150	300	375	450
3X185	370	465	-
С алюминиевыми жилами			
3X10	12	14	16
3X16	19	22	26
3X25	30	35	40
3X35	42	49	56
3X50	60	70	80
3X70	84	98	112
3X95	113	132	151
3X120	144	168	192
3X150	180	210	240
3X185	222	260	296
Трехжильные кабели с резиновой изоляцией С медными жилами			
3X10	27	31	35
3X16	43	50	56
3X25	67	77	87
3X35	94	108	122
3X50	134	154	174
3X70	188	216	244
С алюминиевыми жилами			
3X10	16	17	19
3X16	26	27	30
3X25	40	43	48
3X35	56	60	67
3X50	80	85	95
3X70	112	119	133

Решение.

Определяем коэффициент увеличения экономической плотности тока для начального участка по (8-2):

$$K_y = \sqrt{\frac{98^2(0,08+0,04+0,1+0,08)}{98^2 \cdot 0,08 + 52^2 \cdot 0,04 + 26^2 \cdot 0,1 + 15^2 \cdot 0,08}} = 1,72$$

Экономическую плотность тока для линии с одинаковой нагрузкой по всей длине определяем из табл. 8-1 при числе часов использования максимума менее 3000 для алюминиевых голых проводов: 1,3 а/мм кв.

Для условий примера экономическая плотность тока с учетом распределения нагрузок вдоль линии получается равной:

$$j_s = 1,72 \times 1,3 = 2,24 \text{ а / мм}^2$$

Экономическое сечение линии определяем из (8-1):

$$F_s = \frac{98}{2,24} = 43,7 \text{ мм}^2$$

Останавливаемся для проводов линии на ближайшем стандартном сечении 50 мм кв.

Принятое сечение должно быть проверено по условиям нагревания и потери напряжения.

Пример 8-3.

Выбрать по экономической плотности тока сечение кабелей с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами на 6 кв, питающих электродвигатели насосов. Всего насосных агрегатов три, из которых два являются рабочими, а один - резервным. Расчетный ток каждого кабеля 65 а; число часов использования максимума электродвигателей рабочих насосов 4000.

Решение.

Экономическую плотность тока без учета коэффициента увеличения для условий примера определяем по табл. 8-1: 1,4 а/мм кв. Коэффициент увеличения, учитывающий число рабочих и резервных линий, находим из (8-3). В нашем случае n=3 и n1=2, а коэффициент увеличения получается равным:

$$K_{y1} = \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,22$$

Экономическая плотность тока с учетом режима работы насосных агрегатов составляет

$$j_s = 1,22 \cdot 1,4 = 1,72$$

Экономическое сечение кабеля

$$F_s = \frac{65}{1,72} = 37,8 \text{ мм}^2$$

Принимаем для кабелей ближайшее стандартное сечение 35 ммкв.

18. Потери мощности и электроэнергии в электрических сетях

Потери активной мощности на участке электрической сети, выполненной проводами одинакового сечения, определяются по формуле

$$\Delta P = \alpha_3 N_r = \alpha_3 (N_a + N_r) r, \text{ кВт} \quad (9-1)$$

Потери реактивной мощности на участке электрической сети при одинаковом

индуктивном сопротивлении линии определяются из формулы

$$\Delta Q = \alpha_3 N x = \alpha_3 (N_a + N_r) x, \text{ квар} \quad (9-2)$$

где N_a - сумма произведений квадратов активных нагрузок на длины участков сети с этими нагрузками;

N_r - сумма произведений квадратов реактивных нагрузок на длины участков сети с этими нагрузками;

N - сумма произведений квадратов полных нагрузок на длины участков сети с этими нагрузками;

g и x - активное и индуктивное сопротивления линии, ом/км;

α_3 - коэффициент, зависящий от системы тока и принятых единиц измерения.

Значения входящих в формулы (9-1) и (9-2) величин N_a , N_r и N , коэффициента α_3 и единиц измерения их приведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1 Значения и единицы измерения величин, входящих в формулы (9-1) и (9-2)

Система тока	Сумма произведений квадратов нагрузок на длины участков линии						α_3	Единица измерения
	N_a	Единица измерения	N_r	Единица измерения	N	Единица измерения		
Трёхфазный переменный	$\sum I_a^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$\sum I_r^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$\sum I^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$3 \cdot 10^{-3}$	-
	$\sum P^2 l$	$\text{квт}^2 \cdot \text{км}$	$\sum Q^2 l$	$\text{квар}^2 \cdot \text{км}$	$\sum S^2 l$	$\text{кВа}^2 \cdot \text{км}$	$\frac{10^{-3}}{U_n^2}$	
	$\sum P^2 l$	$\text{Мвт}^2 \cdot \text{км}$	$\sum Q^2 l$	$\text{Мвар}^2 \cdot \text{км}$	$\sum S^2 l$	$\text{МВа}^2 \cdot \text{км}$	$\frac{10^3}{U_n^2}$	
Однофазный переменный	$\sum I_a^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$\sum I_r^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$\sum I^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	$2 \cdot 10^{-3}$	-
	$\sum P^2 l$	$\text{квт}^2 \cdot \text{км}$	$\sum Q^2 l$	$\text{квар}^2 \cdot \text{км}$	$\sum S^2 l$	$\text{кВа}^2 \cdot \text{км}$	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{U_n^2}$	
Постоянный	$\sum I^2 l$	$a^2 \cdot \text{км}$	0	-	-	-	$2 \cdot 10^{-3}$	-
	$\sum P^2 l$	$\text{квт}^2 \cdot \text{км}$	0	-	-	-	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{U_n^2}$	

Потери мощности в трансформаторе определяются по формулам:

потери активной мощности

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_{к.з.} \beta^2, \text{ квт} \quad (9-3)$$

потери реактивной мощности

$$\Delta Q_T = \frac{S_H}{100} (I_{x.x} + U_x \beta^2), \text{ квар} \quad (9-4)$$

где ΔP_c - потери холостого хода трансформатора (потери в стали), кВт;
 $\Delta P_{кз}$ - потери к. з. трансформатора (потери в обмотках) при номинальной нагрузке, кВт;
 $I_{хх}$ - ток холостого хода трансформатора, %;
 U_x - падение напряжения в реактивном сопротивлении трансформатора, %;
 S_H - номинальная мощность трансформатора, ква;
 β - коэффициент загрузки трансформатора;
 $\beta = \frac{S}{S_H} \quad (9-5)$

где S - фактическая нагрузка трансформатора, ква.

Формула (9-4) для определения потерь реактивной мощности в трансформаторе может быть представлена в виде:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{хх} + \Delta Q_H \beta^2, \text{ квар} \quad (9-6)$$

где $\Delta Q_{хх}$ - потери реактивной мощности в трансформаторе при холостом ходе (потери на намагничивание), квар:

$$\Delta Q_{хх} = \frac{S_H I_{хх}}{100}, \text{ квар}$$

ΔQ_H - потери реактивной мощности рассеяния в трансформаторе при номинальной нагрузке, квар:

$$\Delta Q_H = \frac{S_H U_x}{100}, \text{ квар}$$

Падение напряжения в реактивном сопротивлении трансформатора определяется по формуле

$$U_x = \sqrt{U_k^2 - U_r^2}, \% \quad (9-7)$$

где U_k - напряжение к. з. трансформатора, %;

U_r - падение напряжения в активном сопротивлении трансформатора, определяемое из выражения

$$U_r = \frac{\Delta P_{кз}}{S_H} \cdot 100, \% \quad (9-8)$$

Для трансформаторов мощностью более 10 Мва можно принять

$$U_x \approx U_k$$

Некоторые значения величин ΔP_c , $\Delta P_{кз}$, $\Delta Q_{хх}$ и ΔQ_H для понижающих трансформаторов приведены в табл. 9-2. В табл. 9-2 уровень Б потерь активной мощности холостого хода относится к трансформаторам, в которых использована

электротехническая сталь толщиной 0,35 мм марки Э 330 А по ГОСТ 802-58 с жаростойким покрытием и отжигом пластин. В табл. 9-2 даны значения активных и реактивных сопротивлений трансформаторов, приведенные по отношению к номинальному напряжению обмотки ВН.

Таблица 9-2 Технические данные трехфазных двухобмоточных силовых масляных трансформаторов общего назначения (ГОСТ 12022-66)

Номинальная мощность, кВА	Верхний предел номинального напряжения обмотки, кВ	Схема и группа соединений обмоток	Потери активной мощности, кВт			Напряжение к.з., %	Ток холостого хода	Сопротивления обмоток трансформатора, ом		Потери реактивной мощности, квар	
			холостого хода		к.з.			активное	реактивное	холостого хода	к.з.
			уровень А	уровень Б							
25	10	У/У _Н -0	0,105	0,125	0,6	4,5	3,2	96,0	152	0,80	0,95
	10	У/З _Н -11	0,105	0,125	0,69	4,7	3,2	110	152	0,80	0,95
40	10	У/У _Н -0	0,15	0,18	0,88	4,5	3,0	55,0	98,1	1,20	1,57
	10	У/З _Н -11	0,15	0,18	1,0	4,7	3,0	62,5	99,5	1,20	1,59
63	10	У/У _Н -0	0,22	0,265	1,28	4,5	2,8	32,3	63,7	1,76	2,53
	10	У/З _Н -11	0,22	0,265	1,47	4,7	2,8	37,0	64,8	1,76	2,57
	20	У/У _Н -0	0,245	0,29	1,28	5,0	2,8	129	290	1,76	2,88
	20	У/З _Н -11	0,245	0,29	1,47	5,3	2,8	148	302	1,76	3,00
100	10	У/У _Н -0	0,31	0,365	1,97	4,5	2,6	19,7	40,5	2,60	4,05
	10	У/З _Н -11	0,31	0,365	2,27	4,7	2,6	22,7	41,2	2,60	4,12
	35	У/У _Н -0	0,39	0,465	1,97	6,5	2,6	241	759	2,60	6,19
	35	У/З _Н -11	0,39	0,465	2,27	6,8	2,6	278	785	2,60	6,41
160	10	У/У _Н -0	0,46	0,54	2,65	4,5	2,4	10,4	26,2	3,84	6,69
	10	У/Д-11	0,46	0,54	2,65	4,5	2,4	10,4	26,2	3,84	6,69
	10	У/З _Н -11	0,46	0,54	3,1	4,7	2,4	12,1	26,8	3,84	6,85
	35	У/У _Н -0	0,56	0,66	2,65	6,5	2,4	127	481	3,84	10,1
	35	У/Д-11	0,56	0,66	2,65	6,5	2,4	127	481	3,84	10,1
	35	У/З _Н -11	0,56	0,66	3,1	6,8	2,4	148	499	3,84	10,4
250	10	У/У _Н -0	0,66	0,78	3,7	4,5	2,3	5,92	17,0	7,25	10,6
	10	У/Д-11	0,66	0,78	3,7	4,5	2,3	5,92	17,0	7,25	10,6
	10	У/З _Н -11	0,66	0,78	4,2	4,7	2,3	6,72	17,6	7,25	11,0
	35	У/У _Н -0	0,82	0,96	3,7	6,5	2,3	72,5	310	7,25	15,8
	35	У/Д-11	0,82	0,96	3,7	6,5	2,3	72,5	310	7,25	15,8
	35	У/З _Н -11	0,82	0,96	4,2	6,8	2,3	82,3	322	7,25	16,5
400	10	У/У _Н -0	0,62	1,08	5,5	4,5	2,1	3,44	10,7	8,40	17,1
	10	У _Н /Д-11	0,92	1,08	5,5	4,5	2,1	3,44	10,7	8,40	17,1
	10	Д/У _Н -11	0,92	1,08	5,9	4,5	2,1	3,69	10,6	8,40	17,0
	35	У/У _Н -0	1,15	1,35	5,5	6,5	2,1	42,1	195	8,40	25,4
	35	У/Д-11	1,15	1,35	5,5	6,5	2,1	42,1	195	8,40	25,4
630	10	У/У _Н -0	1,42	1,68	7,6	5,5	2,0	1,91	8,52	12,6	33,8
	10	У _Н /Д-11	1,42	1,68	7,6	5,5	2,0	1,91	8,52	12,6	33,8
	10	Д/У _Н -11	1,42	1,68	8,5	5,5	2,0	2,14	8,46	12,6	33,6
	10	У/У _Н -0	1,42	1,68	8,5	5,5	2,0	2,14	8,46	12,6	33,6
	35	У/У _Н -0	1,7	2,0	7,6	6,5	2,0	23,5	124	12,6	40,2
	35	У/Д-11	1,7	2,0	7,6	6,5	2,0	23,5	124	12,6	40,2

Для других номинальных напряжений обмоток сопротивления пересчитываются по формулам:

$$R' = \left(\frac{U_n'}{U_n} \right)^2 R, \text{ ом}$$

$$X' = \left(\frac{U_n'}{U_n} \right)^2 X, \text{ ом}$$

где U_n - номинальное напряжение обмотки, указанное в табл. 9-2, кв;

U_n' - номинальное напряжение обмотки, по отношению к которому пересчитываются сопротивления, кв;

R и X - соответственно активное и реактивное сопротивления трансформатора, определяемые по табл. 9-2, ом.

Потери электроэнергии в сети определяются по формуле

$$\Delta A = \Delta P_{\epsilon} \tau, \text{ квт} \cdot \text{ч} \quad (9-9)$$

где ΔP_{ϵ} - наибольшие потери мощности в сети, кет;

τ - число часов максимальных потерь, определенное в зависимости от годового графика нагрузки.

Потери электроэнергии в трансформаторе определяются по формуле

$$\Delta A = \Delta P_{\epsilon} t_T + \Delta P_{K.3} \beta^2 \tau, \text{ квт} \cdot \text{ч} \quad (9-10)$$

где t_T - число часов работы трансформатора.

Число часов максимальных потерь, если известен годовой график нагрузки, может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{\sum S^2 t}{S_{\epsilon}^2}, \text{ ч/год} \quad (9-11)$$

где $\sum S^2 t$ - сумма произведений квадратов полных нагрузок на годовую продолжительность каждой из них, вычисленная для всего годового графика нагрузок рассматриваемого элемента сети;

S_{ϵ} - наибольшая полная нагрузка элемента сети. Для типичного графика, имеющего сниженные нагрузки ночью и утренний и вечерний максимумы, число часов максимальных потерь согласно в зависимости от числа часов использования максимума может определяться по табл. 9-7.

Таблица 9-7 Число часов максимальных потерь

Число часов использования максимуа	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000
Число часов максимальных потерь	1 300	1 650	2 000	2 500	3 000
Число часов использования максимуа	5 500	6 000	6 500	7 000	7 500
Число часов максимальных потерь	3 650	4 300	5 000	5 700	6 450

Пример 9-1.

Определить годовые потери электроэнергии в трансформаторе типа ТМ мощностью 6,3 Мва с напряжением высшей стороны 10 кв, если трансформатор включен постоянно и годовой график его нагрузки представлен на рис. 9-1.

Решение.

Годовые потери электроэнергии в трансформаторе определяем по (9-10).

По справочным данным находим потери активной мощности в трансформаторе при холостом ходе для уровня Б: $DP_c = 9$ кВт

и нагрузочные потери (потери к. з.) при номинальной нагрузке трансформатора: $DP_{к.з.} = 46,5$ кВт

По условию примера годовое число часов работы трансформатора $t_t = 8760$.

Коэффициент загрузки трансформатора при наибольшей нагрузке составляет:

$$\beta = \frac{4,5}{6,3} = 0,715$$

Число часов максимальных потерь определяем из графика на рис. 9-1, подставив в (9-11) значения нагрузок трансформатора в мегавольт-амперах и соответствующие им продолжительности работы в тысячах часов:

$$\tau = \frac{4,5^2 \cdot 2,5 + 3,5^2 \cdot 3,5 + 1,5^2 \cdot 1,5 + 0,75^2 \cdot 1,26}{4,5^2} \cdot 10^3 = 4830 \text{ ч}$$

Подставив числовые значения в (9-10), определим годовые потери энергии в трансформаторе:

$$A = 9 \cdot 8760 + 46,5 \cdot 0,715^2 \cdot 4830 = 183800 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

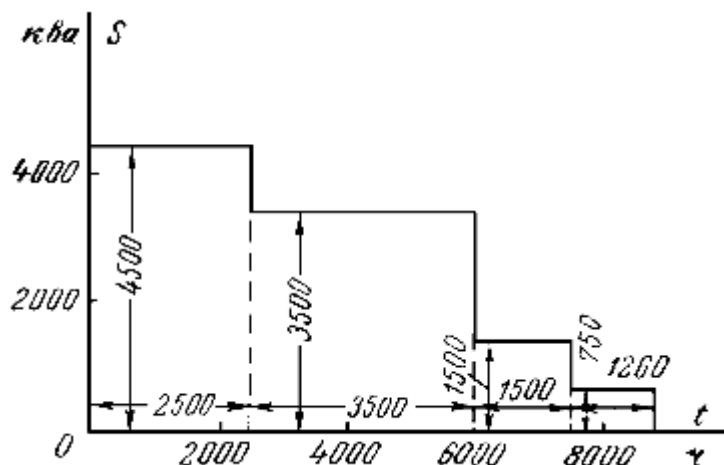


Рис. 9-1. Годовой график нагрузки

Пример 9-2.

На рис. 9-2 представлена схема линии 6 кв с указанием длин участков линии (км) и расчетных (наибольших) нагрузок (Мва). Магистраль АБ выполнена кабелем с алюминиевыми жилами сечением 3X70 мм.кв, а ответвления БВ и БГ - воздушной линией с алюминиевыми проводами сечением 35 мм.кв.

Определить годовые потери электроэнергии в сопротивлениях проводов и кабелей линии,

если годовая продолжительность использования максимума нагрузок составляет 3000 ч и график нагрузок является типичным (имеются утренний и вечерний максимумы и снижение нагрузки в ночное время).

Решение.

Наибольшие потери мощности в сопротивлениях проводов и кабелей линии находим по (9-1), в которой значение коэффициента определяется из табл. 9-1:

$$\alpha_3 = \frac{10^3}{6^2} = 27,8$$

Удельные сопротивления участков линии находим по [табл. 5-1](#): для алюминиевого кабеля сечением 70 мм.кв - 0,46 ом/км; для алюминиевого провода сечением 35 мм.кв - 0,92 ом/км.

Определяем значение величины N для магистрали АБ:

$$N_{AB} = 1,48^2 \cdot 1 + 1,16^2 \cdot 1,5 + 0,6^2 \cdot 1,2 = 4,64 \text{ } Msa^2 \cdot км$$

для ответвлений БВ и БГ

$$N_{B(B+Г)} = 0,18^2 \cdot 2,3 + 0,1^2 \cdot 3 = 0,105 \text{ } Msa^2 \cdot км$$

Из (9-1) находим наибольшие потери мощности в сети:

$$\Delta P_{\varepsilon} = 27,8(4,64 \cdot 0,46 + 0,105 \cdot 0,92) = 86,2 \text{ } кВт$$

По табл. 9-7 в зависимости от продолжительности использования максимума T=3000 ч находим значение числа часов максимальных потерь t=1300. Величину потерь электроэнергии определяем по (9-9):

$$\Delta A = 86,2 \cdot 1300 = 112000 \text{ } кВт \cdot ч$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети
2. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов. Под ред. Блок В.М.
3. Поспелов Г.Е. Федин В.Т. Электрические системы и сети. Проектирование
4. Правила эксплуатации электроустановок ПУЭ издание 6, 7-е дополненное
5. Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Дудченко Л.Н. Электрические сети в примерах и расчётах: Учебное пособие. Благовещенск, Издательство АмГУ, 1999, 238 с.
6. Электротехнический справочник: В 4 т. Т 3. Производство, передача и распределение электрической энергии. Под общ. Ред. Проф. МЭИ Герасимова В.Г. и др. – 8-е изд., испр. И доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002 г, 964 с.
7. Основы современной энергетики: учебник для вузов : в 2 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. :Издательский дом МЭИ, 2008. Том 2. Современная электроэнергетика / под ред. профессоров А.П. Бурмана и В.А. Строева. - 632 с., ил.
8. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения). Утвержден Приказом Минпромэнерго России от 22 февраля 2007 г. №49