

ЛЕКЦИЯ № 6

Выбор числа и мощности силовых трансформаторов.

Цель лекции:

- ознакомление с принципами выбора количества силовых трансформаторов для обеспечения электроэнергией потребителей цеха,
- ознакомление со шкалой номинальных мощностей трансформаторов,
- определение требуемой мощности силовых трансформаторов.

1. Выбор числа трансформаторов.

Правильный выбор числа и мощности трансформаторов на подстанциях промышленных предприятий является одним из важных вопросов электроснабжения и построения рациональных сетей. В нормальных условиях трансформаторы должны обеспечивать питание всех потребителей предприятия при их номинальной нагрузке.

Число трансформаторов на подстанции определяется требованием надёжности электроснабжения. С таким подходом наилучшим является вариант с установкой двух трансформаторов, обеспечивающий бесперебойное электроснабжение потребителей цеха любых категорий. Однако если в цехе установлены приёмники только II и III категории, то более экономичными, обычно, являются однитрансформаторные подстанции. При проектировании внутризаводских сетей установка однитрансформаторных подстанций выполняется в том случае, когда обеспечивается резервирование потребителей по сети низкого напряжения, а также когда возможна замена повреждённого трансформатора в течение нормируемого времени.

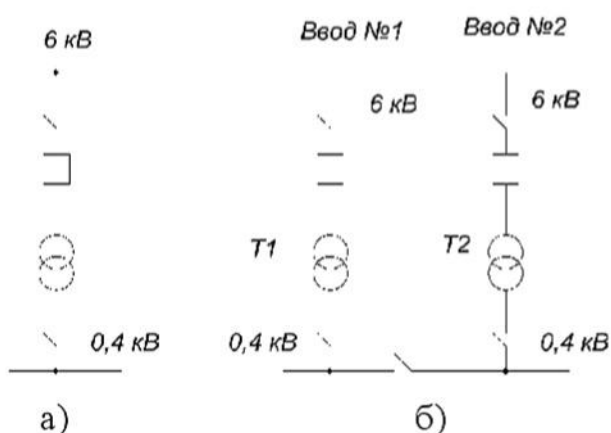


Рис. 6.1 Схемы электроснабжения цеха с одним (а), и двумя (б) трансформаторами

Двухтрансформаторные подстанции применяются при значительном числе потребителей II категории, либо при наличии потребителей I категории. Кроме того, двухтрансформаторные подстанции целесообразны при неравномерном суточном и годовом графике нагрузки предприятия, при сезонном режиме работы при значительной разнице нагрузки в сменах. Тогда при снижении нагрузки один из трансформаторов отключается.

Задача выбора количества трансформаторов заключается в том, чтобы из двух вариантов (рис. 6.1 а и б) выбрать вариант с лучшими технико-экономическими показателями. Оптимальный вариант схемы электроснабжения выбирается на основе сравнения приведённых годовых затрат по каждому варианту:

$$Z_i = C_{э,i} + k_{н,э} K_i + U_i, \quad (6.1)$$

где $C_{э,i}$ – эксплуатационные расходы i -го варианта, $k_{н,э}$ – нормативный коэффициент эффективности, K_i – капитальные затраты i -го варианта, U_i – убытки потребителя от перерыва электроснабжения. Следует отметить, что при варианте рис. 6.1 (а) наступает полный перерыв в электроснабжении, и здесь питание потребителей по резервной линии на напряжение 0,4 кВ не может быть принято во внимание, так как такая схема аналогична двухтрансформаторной схеме, но с худшими показателями за счёт длинной линии 0,4 кВ.

При сравнении вариантов немаловажную роль играет вопрос о перспективном развитии предприятия. Так, например, если в настоящее время в цехе имеются потребители только второй категории, то рассмотрение вариантов имеет смысл. Но если, через год планируется переоборудование производства, и в цехе появляются потребители первой категории, то необходимо, безусловно, выбирать вариант с двумя трансформаторами.

В основном, установка двух трансформаторов обеспечивает надёжное питание потребителей. Это значит, что при повреждении одного трансформатора, второй, с учётом его перегрузочной способности, обеспечивает 100 % надёжность питания в течении времени, необходимого для ремонта трансформатора.

Но, бывают случаи, когда мощность уже существующих двух трансформаторов становится недостаточной, для обеспечения питанием всех приёмников, например, при установке более мощного оборудования, изменение режима работы электроприёмников и т.п. Тогда рассматриваются варианты установки более мощных трансформаторов на подстанции, либо установки третьего трансформатора для покрытия возросшей мощности. Второй вариант кажется предпочтительней, поскольку увеличивается надёжность подстанции, отпадает необходимость реализовывать старые трансформаторы и капитальные затраты на установку третьего трансформатора, как правило, значительно меньше, чем при переоборудовании всей подстанции. Но такой вариант возможен не всегда, например, при плотной застройке территории предприятия для дополнительного трансформатора просто может не хватить места. С другой стороны, происходит значительное усложнение схемы, которое может оказаться невозможной при работе трансформаторов в параллель. Поэтому рассмотрение вариантов производится в каждом конкретном случае индивидуально.

Кроме требований надёжности при выборе числа трансформаторов следует учитывать режим работы приёмников. Так, например, при низком коэффициенте заполнения графика нагрузки бывает экономически целесообразна установка не одного, а двух трансформаторов.

На крупных трансформаторных подстанциях, ГПП, как правило, число трансформаторов выбирается не более двух. Это обусловлено, главным образом тем, что стоимость коммутационной аппаратуры на стороне высшего напряжения предприятия соизмерима со стоимостью трансформатора.

2. Параллельная работа трансформаторов.

Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов необходимо для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в случае аварийного выхода из строя какого-либо трансформатора, либо отключение его для ремонта.

Параллельная работа трансформаторов целесообразна при работе электроустановки с переменным графиком нагрузки. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один трансформатор, для того, чтобы нагрузка оставшегося в работе трансформатора была близка к номинальной. При работе трансформатора с полной нагрузкой его эксплуатационные показатели будут достаточно высокими.

Параллельной работой трансформаторов называется такая работа, при которой одноимённые выводы как на первичной, так и на вторичной стороне соединены между собой. Работа трансформаторов при соединении одноимённых выводов только одной из обмоток не является параллельной работой. При нормальной параллельной работе уравнивающие токи между параллельно включёнными трансформаторами отсутствуют, нагрузка между трансформаторами распределяется пропорционально их мощностям, а токи нагрузки совпадают по фазе. Для обеспечения нормальной параллельной работы трансформаторов необходимо соблюсти следующие условия:

1. Группа соединений обмоток ВН и НН трансформаторов должна быть одинакова. При несоблюдении этого требования между обмотками трансформаторов будет циркулировать ток, по величине в несколько раз превосходящий номинальные токи трансформаторов.
2. Коэффициенты трансформации линейных напряжений при холостом ходе должны быть равны. При неодинаковых коэффициентах трансформации вторичные напряжения также неодинаковы, вследствие чего между замкнутыми контурами первичных и вторичных обмоток будут также протекать большие уравнивающие токи. При нагрузке большую её часть принимает на себя тот трансформатор, который имеет более высокое вторичное напряжение при холостом ходе.
3. Напряжения короткого замыкания должны быть равны. Это требование вызвано тем, что при параллельной работе трансформаторов с различными значениями напряжений короткого замыкания нагрузка распределяется между ними прямо пропорционально их номинальным

мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания. Параллельная работа трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания допустима при условии, что ни один из параллельно работающих трансформаторов при этом не будет перегружен.

4. Соотношение мощностей параллельно работающих трансформаторов не должно превышать 3:1. Несоблюдение этого требования приводит к перегрузке одного (менее мощного) при недогрузке другого (более мощного) из трансформаторов, в результате чего общая мощность включенных параллельно трансформаторов окажется неиспользованной.

3. Выбор номинальной мощности трансформаторов.

Выбор мощности трансформаторов производится исходя из расчётной нагрузки объекта электроснабжения, числа часов использования максимума нагрузки, темпов роста нагрузок, допустимой перегрузки трансформаторов.

Мощность силовых трансформаторов должна обеспечивать в нормальных условиях питание всех приёмников электроэнергии. При выборе мощности трансформаторов следует добиваться наиболее целесообразного режима работы и соответствующего обеспечения резервирования питания приёмников при отключении одного из трансформаторов, причём нагрузка трансформатора в нормальных условиях не должна вызывать сокращения естественного срока службы.

Надёжность электроснабжения достигается установкой на подстанции двух трансформаторов, которые, как правило, работают отдельно.

Совокупность допустимых нагрузок, систематических или аварийных перегрузок определяет нагрузочную способность трансформаторов, в основу расчёта которой положен тепловой износ изоляции трансформаторов. Если не учитывать нагрузочную способность трансформатора, то можно необоснованно завысить выбираемую установленную мощность, что экономически нецелесообразно. Исследования показали, что систематические перегрузки трансформаторов не приводят к заметному сокращению их срока службы. Это объясняется компенсацией недоиспользования трансформатора с нагрузками ниже номинальных.

Номинальной мощностью трансформатора называют мощность, на которую он может быть нагружен непрерывно в течение всего срока службы при нормальных температурных условиях окружающей среды.

Если известны расчётная максимальная мощность объекта $S_{нагр}$ и коэффициент допустимой перегрузки $\beta_{доп}$ то номинальная мощность трансформатора:

$$S_{ном} = \frac{S_{нагр}}{\beta_{доп}} \quad (6.2)$$

Коэффициент допустимой перегрузки обычно выбирается на основе опытных данных. Рекомендуемые значения $\beta_{доп}$ указаны в таблице 6.1.

После выбора трансформатора таким образом должна производиться проверка трансформатора по температурному режиму.

При превышении температуры окружающей среды для имеющегося графика нагрузок определяют повышенный износ изоляции и решают вопрос о допустимости этого износа. Если такой износ недопустим, то нагрузка на трансформатор должна быть уменьшена.

Таблица 6.1

Характер нагрузки и вид ТП	$\beta_{\text{доп}}$
Нагрузка первой категории на двухтрансформаторных ТП	0,7
Нагрузка второй категории на однострансформаторных ТП	0,75
Нагрузка второй категории и при наличии резерва на складе	0,9
На крупных подстанциях, ГПП	0,5

Для выбора мощности трансформатора с учётом допустимых нагрузок и перегрузок удобно пользоваться суточным графиком нагрузки, преобразованным в двухступенчатый (рис. 6.2).

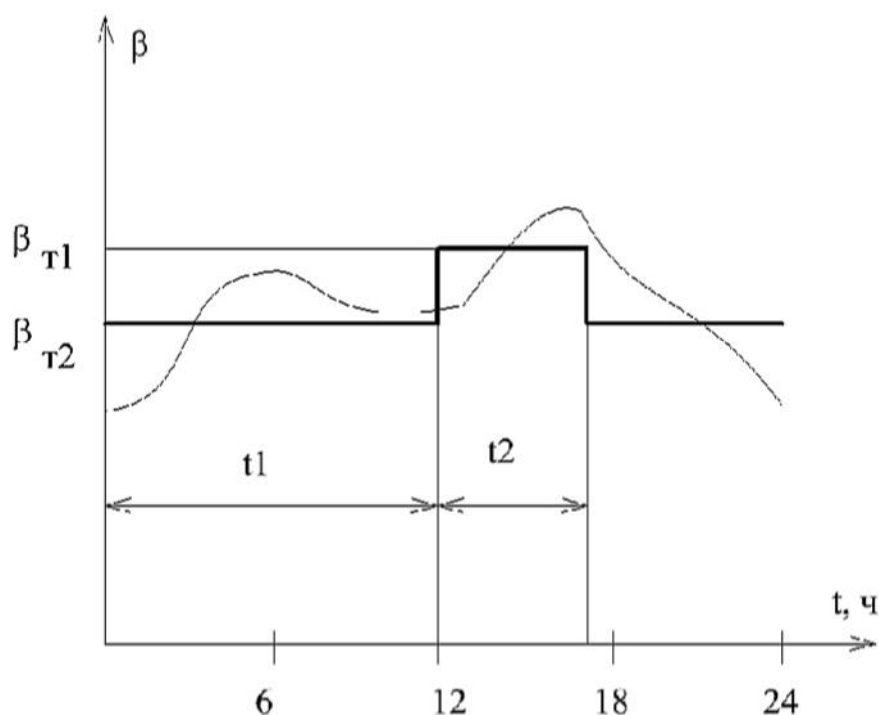


Рис. 6.2. Суточный график нагрузки и его преобразованный вид в двухступенчатый.

Если график нагрузок многоступенчатый, то его следует разбить на участки с одно-, двухступенчатой нагрузкой. Расчёт в этом случае производится для каждого участка.

Для цеховых трансформаторов мощностью до 1000 кВА можно применить упрощённый способ определения мощности по температуре. Этим способом можно проверять мощность трансформаторов с естественным масляным охлаждением при установке на открытом воздухе и изменяющейся

температуре окружающего воздуха до $+35^{\circ}\text{C}$ или среднегодовой температуре до $+5^{\circ}\text{C}$. Для этих условий превышение температуры обмоток над температурой среды не должно превосходить 70°C , отсюда наибольшая температура обмотки составляет $35+70=105^{\circ}\text{C}$. Эта температура имеет место только при $+35^{\circ}\text{C}$. При меньших температурах окружающей среды температура трансформатора должна быть меньше на соответствующую величину.

При условиях, отличных от вышеуказанных номинальная мощность трансформатора определяется из:

$$S_{\text{ном}} = S_{\text{ном},n} \left(1 + \frac{5 - \theta_{\text{ср}}}{100}\right), \quad (6.3)$$

где $S_{\text{ном},n}$ – номинальная паспортная мощность трансформатора, $\theta_{\text{ср}}$ – среднегодовая температура.

Как указывалось выше, при расчёте мощности трансформатора необходимо учитывать его перегрузочную способность. Допускаются аварийная и систематическая перегрузки.

Аварийная перегрузка. В соответствии с нормативными документами трансформатор длительно до 5 суток можно перегружать на 40 %, но суммарная перегрузка за сутки не должна превышать 6 ч.

Систематическая перегрузка. Перегрузочная способность зависит от графика нагрузок, а именно коэффициентом заполнения:

$$k_{\text{зан}} = \frac{S_{\text{ср}}}{S_{\text{max}}}, \quad (6.4)$$

где $S_{\text{ср}}$ – средняя мощность, S_{max} – максимальная мощность.

Допустимую нагрузку на трансформатор можно определить:

$$S_{\text{дон}} = S_{\text{ном},n} (1 - k_{\text{зан}}) 0,3 \quad (6.5)$$

Кроме того, трансформатор может быть перегружен зимой за счёт снижения его нагрузки в летнее время. В соответствии с этим допускается перегрузка в зимнее время на 1 % на каждый процент недогрузки в летнее время, но не более чем на 15%.

В системах электроснабжения предприятий довольно часто встречается несимметричная нагрузка по фазам. При работе трансформатора в таком режиме, при выборе мощности по максимально нагруженной фазе, будет иметь место явное недоиспользование трансформатора. Ток в наиболее загруженной фазе может быть допущен выше номинального. Коэффициент перегрузки при этом, определяется как:

$$k_{\text{пер}} = \frac{I_A}{I_{\text{ном}}}, \quad (6.6)$$

где I_A – ток наиболее загруженной фазы.

Очевидно, что решить задачу выбора номинальной мощности трансформатора, исходя лишь из условий допустимой температуры сразу невозможно, так как эта мощность определяется ещё не выбранным

трансформатором. Аналитически эта задача может быть решена только методом последовательных приближений. С другой стороны, точное решение задачи вряд ли необходимо, поскольку график нагрузок предприятия, а, следовательно, и трансформаторов является весьма неравномерным. Поэтому на первом этапе рекомендуется выбирать из условий надёжности и допустимой нагрузки в нормальном режиме и перегрузки в аварийном режиме. Обычно принимают к рассмотрению два варианта мощности трансформатора.

В условиях эксплуатации, когда трансформаторы уже установлены, следует предусматривать экономически целесообразный режим работы трансформаторов, суть его заключается в том, что при наличии на ТП нескольких трансформаторов, число включенных в работу определяется условием, обеспечивающим минимум потерь мощности в этих трансформаторах. При этом должны учитываться не только потери активной мощности в трансформаторах, но и потери в смежном оборудовании. Эти потери называются приведёнными. Тогда расчётная нагрузка трансформатора будет определяться из выражения:

$$S_{рас} = S_{ном} \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_x^I}{\Delta P_K^I}}, \quad (6.7)$$

где n – количество трансформаторов на ТП, ΔP_x^I – приведённые потери холостого хода, ΔP_K^I – приведённые потери короткого замыкания.

4. Шкала стандартных мощностей трансформаторов.

В нашей стране принята единая шкала мощностей трансформаторов. Выбор рациональной шкалы является одной из основных задач при оптимизации систем промышленного электроснабжения. На сегодняшний день существует две шкалы мощностей: с шагом 1,35 и с шагом 1,6. То есть первая шкала включает мощности: 100, 135, 180, 240, 320, 420, 560 кВА и т. д., а вторая включает 100, 160, 250, 400, 630, 1000 кВА и т. д. трансформаторы первой шкалы мощностей в настоящее время не производятся и используются на уже существующих ТП, а для проектирования новых ТП применяется вторая шкала мощностей.

Следует отметить, что шкала с коэффициентом 1,35 более выгодна с точки зрения загрузки трансформаторов. Например, при работе двух трансформаторов с коэффициентом загрузки 0,7 при отключении одного трансформатора второй перегружается на 30 %. Такой режим работы соответствует требованиям условий работы трансформатора. Таким образом, мощность трансформатора может использоваться полностью.

При допустимой перегрузке в 40 % появляется недоиспользование установленной мощности трансформаторов со шкалой 1,6.

Допустим, два трансформатора на ТП работают раздельно и нагрузка каждого составляет 80 кВА, при отключении одного из них второму требуется обеспечить нагрузку 160 кВА. Вариант установки двух трансформаторов по 100 кВА не может быть принят, поскольку в этом случае

перегрузка составит 60 % при выводе из работы одного трансформатора. При установке же трансформаторов по 160 кВА ведёт к загрузке трансформаторов в нормальном режиме лишь на 50%.

При использовании шкалы с шагом 1,35 можно установить трансформаторы мощностью 135 кВА, тогда их загрузка в нормальном режиме составит 70 %, а в аварийном перегрузка составит не более 40%.

Исходя из этого примера видно, что шкала с шагом 1,35 более рациональна. А около 20% мощности выпускаемых трансформаторов не используется. Возможным решением этой проблемы является установка двух трансформаторов на ТП разной мощности. Однако это решение нельзя считать технически рациональным, поскольку при выводе из строя трансформатора большей мощности, оставшийся трансформатор не покрывает всю нагрузку цеха.

Встаёт закономерный вопрос: чем был обусловлен переход на новый ряд мощностей? Ответ, видимо, кроется в сокращении многообразия мощностей для унификации оборудования: не только трансформаторов, но и смежного с ним (выключатели, выключатели нагрузки, разъединители и др.).

Исходя из всего сказанного, выбор числа и мощности трансформаторов для питания заводских подстанций производится следующим образом:

- 1) определяется число трансформаторов на ТП, исходя из обеспечения надёжности электроснабжения с учётом категории приёмников;
- 2) выбираются наиболее близкие варианты мощности выбираемых трансформаторов (не более трёх) с учётом допустимой нагрузки их в нормальном режиме и допустимой перегрузке в аварийном режиме;
- 3) определяется экономически целесообразное решение из намеченных вариантов, приемлемое для конкретных условий;
- 4) учитывается возможность расширения или развития ТП и решается вопрос о возможной установке более мощных трансформаторов на тех же фундаментах, либо предусматривается возможность расширения подстанции за счёт увеличения числа трансформаторов.

Вопросы для самопроверки.

1. Сформулируйте общие положения по выбору числа трансформаторов на подстанции.
2. По каким критериям выбирается мощность трансформаторов?
3. Как производится проверка трансформатора с учётом его перегрузочной способности?
4. Укажите порядок расчёта ТП.
5. Чем обусловлен существующий ряд мощностей трансформаторов?