

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический университет»**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

учебно-методическое пособие для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Майкоп 2019

УДК 621.31(07)

ББК 31.2

Э 45

**Составитель: Старков Н.Н., кандидат технических наук,
доцент**

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной
форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника

Содержание

1. Лекция №1. Введение. Графики электрических нагрузок.....	4
2. Лекция № 2. Характеристики промышленных потребителей электроэнергии.....	10
3. Лекция № 3. Электрические нагрузки промышленных предприятий.....	18
4. Лекция №4. Показатели, характеризующие приёмники электроэнергии и графики их нагрузки.....	24
5. Лекция № 5. Определение электрических нагрузок различными методами	34
6. Список литературы.....	44

Лекция № 1. Введение. Графики электрических нагрузок

Содержание лекции:

- электроснабжение потребителей как подсистема энергетической и технологической систем; изучение видов графиков нагрузок.

Цели лекции:

- знакомство с основными определениями и отраслями промышленности; методы построения графиков нагрузок, годовой график по продолжительности.

Электроснабжение потребителей как подсистема энергетической и технологической систем

Система электроснабжения промпредприятия является подсистемой энергосистемы, обеспечивающей комплексное электроснабжение промышленных, транспортных, коммунальных и сельскохозяйственных потребителей данного района. В то же время система электроснабжения промпредприятия является подсистемой технологической системы производства данного предприятия, которая предъявляет определенные требования к электроснабжению.

Системы электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий создаются для обеспечения питания электроэнергией промышленных приемников электрической энергии, к которым относятся электродвигатели различных машин и механизмов, электрические печи, электролизные установки, аппараты и машины для электрической сварки, осветительные установки и другие промышленные приемники электроэнергии.

В настоящее время большинство потребителей получает электрическую энергию от энергосистем, которые объединяют с помощью линий электропередач источники электроэнергии – электрические станции.

Энергетической системой (энергосистемой) называется совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электроэнергии и теплоты при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетической системой называется электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электроэнергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Электроснабжение – обеспечение потребителей электроэнергией.

Система электроснабжения (СЭС) совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией.

Централизованное электроснабжение – электроснабжение потребителей электроэнергии (ЭП) от энергосистемы.

Электрическая сеть – совокупность электроустановок для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций (п/ст), и распределительных устройств (РУ), токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории.

Приемник электроэнергии (электроприемник, ЭП) – аппарат, агрегат и др., предназначенный для преобразования электроэнергии в другой вид энергии.

Потребитель электроэнергии – ЭП или группа ЭП, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Независимый источник питания – источник, на котором сохраняется напряжение в послеаварийном режиме в регламентированных пределах при исчезновении его надругом или других источниках питания.

В то же время на ряде предприятий продолжается сооружение собственных ТЭЦ, что обуславливается рядом причин:

а) потребностью в тепловой энергии для технологических целей и отопления и эффективностью попутного производства при этом электрической энергии;

б) необходимостью резервного питания для ответственных потребителей;

в) большой удаленностью некоторых предприятий от энергосистем.

Промышленные объекты относятся к отраслям промышленности, которые укрупненно можно разделить следующим образом:

а) горнодобывающая промышленность (угольные шахты и рудники; карьеры открытой добычи угля, руды и нерудных ископаемых; нефтепромыслы; горно-обогачительные комбинаты и агломерационные фабрики);

б) черная металлургия (коксохимические цеха; установки доменных цехов; установки мартеновских и конверторных цехов; установки прокатных цехов);

в) машиностроение и металлообработка (металлорежущие станки; кузнечно-штамповочные машины и прессы; деревообрабатывающие станки; электроинструмент);

г) химическая промышленность (азотная промышленность, производство соды, суперфосфата, серной кислоты, карбида кальция, хлора, металлического натрия, резиновых шин и технических изделий, синтетического каучука и т.д.);

д) нефтеперерабатывающая промышленность;

е) бумажно-целлюлозная промышленность;

ж) текстильная и легкая промышленность (прядаильные и ткацкие фабрики хлопчатобумажных, суконных и искусственных тканей; обувные, галантерейные, меховые и другие фабрики);

и) промышленность строительных материалов (цементные, стекольные, кирпичные заводы, заводы железобетонных изделий);

к) Пищевая промышленность (элеваторы, мельницы, крупяные и комбикормовые заводы, хлебозаводы, сахарные, молочные, спиртовые и другие заводы).

На промышленных предприятиях всех отраслей можно выделить большую группу общепромышленных установок, к которым относятся:

а) подъемно-транспортные машины (тельферы, кран-балки, мостовые, консольные и козловые краны, подъемники, лифты, манипуляторы и другие);

б) поточно-транспортные системы (конвейеры, перегрузочные механизмы, транспортеры, шнеки, нории);

в) компрессоры, насосы, вентиляторы.

Особо следует выделить такую отрасль промышленности как электротехнология, в которую входят: а) электротермические установки (ЭТУ); б) электросварочные установки; в) электролизные установки; г) электрические методы обработки металлов; д) установки электрического поля высокого напряжения.

Наиболее распространенным потребителем электроэнергии является электрическое освещение производственных помещений (лампы накаливания, галогенные лампы, люминесцентные лампы, ртутные кварцевые лампы, ксеноновые и натриевые лампы).

Графики электрических нагрузок

Электрическая нагрузка характеризует потребление электроэнергии отдельными приемниками, группой приемников в цехе, цехом и заводом в целом. При проектировании и эксплуатации систем электроснабжений промышленных предприятий основными являются три вида нагрузок: активная мощность P , реактивная мощность Q и ток I .

Электрическая мощность может наблюдаться визуально по измерительным приборам. Регистрировать изменение нагрузки во времени можно самопишущими приборами (рисунок 1). В условиях эксплуатации

изменения нагрузки по активной и реактивной мощности во времени записывают, как правило, в виде ступенчатой кривой по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии, снятым через одинаковые интервалы времени t_n (рисунок 2).

Кривые изменения активной и реактивной мощностей и тока во времени называются графиками нагрузок соответственно по активной мощности, реактивной мощности и току.

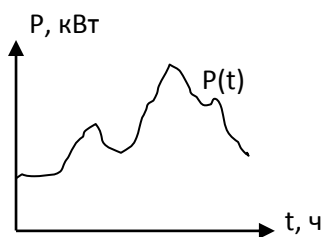


Рисунок 1 – График нагрузок по записи регистрирующим прибором

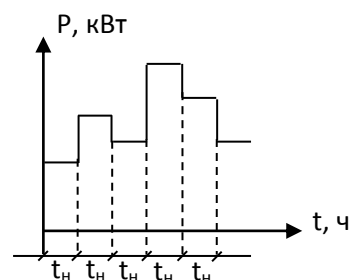


Рисунок 2 – График нагрузок по показаниям счетчика активной энергии

t_n - одинаковые интервалы

Графики нагрузок подразделяются на индивидуальные - для отдельных приемников электроэнергии и групповые – для группы приемников электроэнергии. Индивидуальные графики нагрузок обозначаются строчными буквами: $p(t)$; $q(t)$; $i(t)$; групповые графики нагрузок обозначаются прописными буквами: $P(t)$; $Q(t)$; $I(t)$.

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) ;$$

здесь n – число приемников

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) ;$$

$$I(t) = \frac{\sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}}{\sqrt{3}U_{НОМ}} .$$

Индивидуальные графики необходимы для определения нагрузок мощных приемников электроэнергии (электрических печей, преобразовательных агрегатов главных приводов прокатных станов и т.п.)

При проектировании электроснабжения промышленных предприятий, как правило, используются групповые графики нагрузок. Графики нагрузок всего промышленного предприятия дают возможность определить потребление активной и реактивной электроэнергии предприятием, правильно и рационально выбрать питающие предприятия источники тока, а также выполнить наиболее рациональную схему электроснабжения.

По продолжительности различают сменные, суточные и годовые графики нагрузок предприятия. Каждая отрасль промышленности имеет свой характерный график нагрузок, определяемый технологическим процессом.

С точки зрения регулярности режимов приемников их индивидуальные графики нагрузок могут быть подразделены на периодические, циклические и нециклические и нерегулярные.

Групповые графики подразделяются на периодические, почти периодические и нерегулярные.

Построение годового графика по продолжительности

Наиболее загруженным днем в году принято считать 22.12, а наименее загруженным – 22.06. Имея суточные графики этих дней, можно построить годовой график по продолжительности. В зависимости от климатической зоны мы имеем N_3 и $N_л$ – количество зимних и летних дней в году.

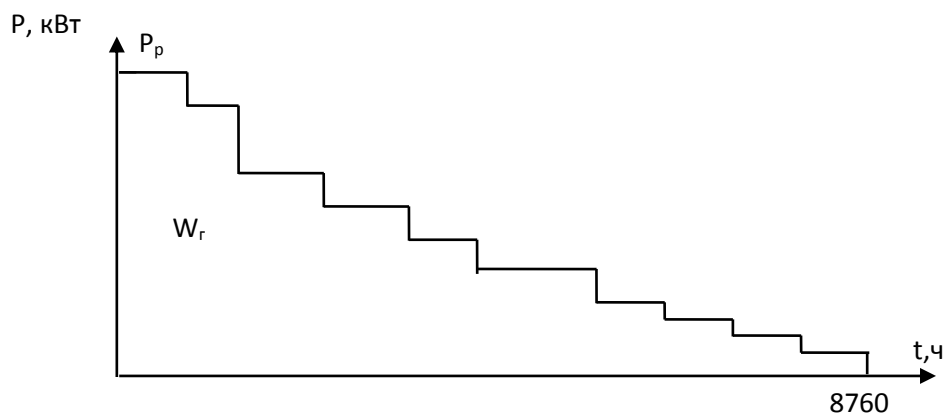


Рисунок 3 – Годовой график по продолжительности

На зимнем графике максимальная ордината продолжительностью более или равная 30 минутам принимается за расчетную. Для каждой ординаты зимнего и летнего графика подсчитывается продолжительность соответствующей нагрузки за год и строится падающий ступенчатый график по продолжительности за год. Площадь годового графика равна в определенном масштабе расходу электроэнергии за год. Такой график характеризует эффективность работы предприятия по расходу электроэнергии.

Лекция № 2. Характеристики промышленных потребителей электроэнергии

Содержание лекции:

- даются основные определения и обозначения по теме.

Цели лекции:

- изучить электрические нагрузки – средние, среднеквадратичные, максимальные, расчетные.

Потребители электроэнергии характеризуются по нескольким параметрам:

а) приемники электроэнергии промпредприятий по роду тока делятся на следующие группы:

1) приемники трехфазного тока напряжением до 1000 В, частотой 50 Гц;

2) приемники трехфазного тока напряжением выше 1000 В, частотой 50 Гц;

3) приемники однофазного тока напряжением до 1000 В, частотой 50 Гц;

4) приемники, работающие с частотой, отличной от 50 Гц, питаемые от преобразовательных подстанций и установок;

5) приемники постоянного тока, питаемые от преобразовательных подстанций и установок.

В настоящее время электроснабжение промпредприятий ведется на переменном трехфазном токе. Для питания групп приемников постоянного тока сооружаются преобразовательные подстанции, на которых устанавливаются преобразовательные агрегаты: полупроводниковые выпрямители, ртутные выпрямители, двигатели-генераторы (ГД) и механические выпрямители.

Преобразовательные агрегаты питаются от сети трехфазного тока и являются поэтому приемниками трехфазного тока.

Приемники постоянного тока, имеющие индивидуальные преобразовательные агрегаты: электропривод по системе ГД, ионный электропривод и т.п., являются с точки зрения электроснабжения приемниками трехфазного тока.

Часто встречающиеся приемники постоянного тока, требующие питания от преобразовательных подстанций: внутризаводской электрифицированный транспорт, электролизные производства, некоторые электродвигатели подъемно-транспортных и вспомогательных механизмов;

б) по напряжению – согласно ПУЭ электротехнические установки, производящие, преобразующие, распределяющие и потребляющие электроэнергию, подразделяющиеся на электроустановки напряжением до 1000 В и электроустановки напряжением выше 1000 В;

в) режимы нейтралей:

1) установки напряжением до 1000 В выполняются как с глухо заземленной, так и с изолированной нейтралью, а установки постоянного тока – с глухо заземленной и изолированной нулевой точкой.

Электрические установки до 1000 В с изолированной нейтралью следует применять при повышенных требованиях по безопасности (торфяные разработки, угольные шахты и т.п.) при условии, что в этом случае обеспечивается контроль изоляции сети и целостность пробивных предохранителей, быстрое обнаружение персоналом замыканий на землю и быстрая ликвидация их, либо автоматическое отключение участков с замыканием на землю.

В четырехпроводных сетях переменного тока и трехпроводных сетях постоянного тока без повышенной опасности глухое замыкание нейтралей обязательно;

2) электроустановки напряжением выше 1000 В делятся на установки:

– с изолированной нейтралью (напряжение до 35 кВ);

– с нейтралью, включенной на землю через индуктивное сопротивление для компенсации емкостных токов (напряжение до 35 кВ и редко 110 кВ);

– с глухо заземленной нейтралью (напряжение 110 кВ и выше).

Кроме того, все эти установки подразделяются на установки с малыми токами замыкания на землю (до 500 А) и установки с большими токами замыкания на землю (более 500 А);

г) по частоте тока приемники электроэнергии делятся на приемники промышленной частоты (50 Гц) и приемники с высокой (выше 100 кГц), повышенной (до 10 кГц) и пониженной (ниже 50 Гц) частотами.

Большинство приемников используют электроэнергию нормальной промышленной частоты. Установки высокой и повышенной частоты применяются для нагрева под закалку, ковку и штамповку металлов, а также для плавки металлов. К приемникам с повышенной частотой относятся, например, электродвигатели в текстильной промышленности при производстве искусственного шелка (частота 133 Гц);

д) приемники электроэнергии могут быть подразделены на группы по сходству режимов, то есть по сходству графиков нагрузки. Деление потребителей на группы позволяет более точно находить суммарную электрическую нагрузку.

Различают три характерные группы приемников:

а) приемники, работающие с продолжительной неизменной или мало меняющейся нагрузкой (рисунок 4). В этом режиме электрическая машина или аппарат может работать продолжительное время без повышения температуры отдельных частей машины или аппарата свыше допустимой.

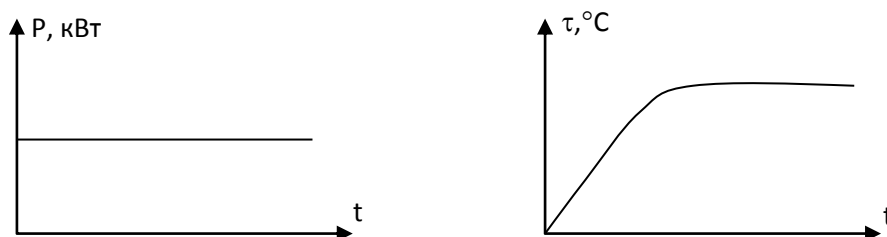


Рисунок 4

Примерами приемников, работающих в этом режиме, являются электродвигатели компрессоров, насосов, вентиляторов, и т.п.;

б) приемники, работающие в режиме кратковременной нагрузки. В этом режиме рабочий период машины или аппарата не настолько длителен, чтобы температура отдельных частей машины или аппарата могла достигнуть установившегося значения (рисунок 5). Период остановки машины или аппарата настолько длителен, что машина практически успевает охладиться до температуры окружающей среды.

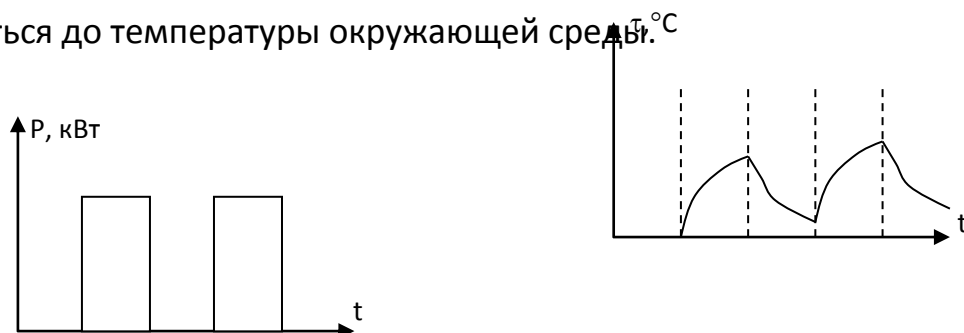


Рисунок 5

Примерами данной группы приемников являются электродвигатели электроприводов вспомогательных механизмов металлорежущих станков (механизмы подъема поперечины, зажимы колонн, двигатели быстрого перемещения суппортов и др.), задвижки, затворы и т.п.;

в) приемники, работающие в режиме повторно-кратковременной (ПКР) нагрузки (рисунок 6). В этом режиме кратковременные рабочие периоды машины или аппарата чередуются с кратковременными периодами отключения. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ) и длительностью цикла. В повторно-кратковременном режиме электрическая машина или аппарат может работать с допустимой для них относительной продолжительностью включения неограниченное время, причем,

превышение температур отдельных частей машины или аппарата не выйдет за пределы допустимых значений.

Примером этой группы приемников являются электродвигатели кранов, сварочные аппараты, прокатные станы и др.

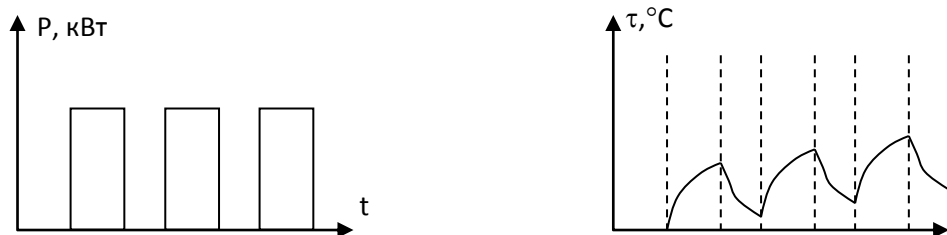


Рисунок 6

Для перечисленных режимов работы приемников в соответствии с ГОСТ 183-74 электропромышленность выпускает электродвигатели, рассчитанные на указанные условия работы;

е) несимметричность нагрузки или неравномерность загрузки фаз. К симметричным нагрузкам относятся электродвигатели трехфазных потребителей и трехфазные печи. К несимметричным нагрузкам (одно-двухфазным) следует отнести электрическое освещение, однофазные и двухфазные печи, однофазные сварочные аппараты и т.п. в том случае, когда распределить их симметрично по фазам не удастся;

ж) надежность (бесперебойность) питания. [ПУЭ 1998 г].

В отношении обеспечения надежности электроснабжения электроприемники разделяются на следующие три категории:

а) электроприемники I категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству; повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства.

Из состава электроприемников I категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для

безаварийной остановки производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования;

б) электроприемники II категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей;

в) электроприемники III категории – все остальные электроприемники, не подходящие под определения I и II категории.

Электроприемники I категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников I категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

В качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприемников I категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем, специальные агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т.п.

Для электроприемников II категории рекомендуется питание от двух независимых взаимно регулирующих источников. При нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

Для электроприемников III категории электроснабжение может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают 1 суток.

Лекция № 3. Электрические нагрузки промышленных предприятий

Содержание лекции:

- основные определения и обозначения нагрузки.

Цели лекции:

- изучение видов нагрузок: средних, среднеквадратичных, максимальных, расчетных.

Основой рационального решения всего сложного комплекса технико-экономических вопросов при проектировании электроснабжения современного промышленного предприятия является правильное определение ожидаемых электрических нагрузок. Определение электрических нагрузок является первым этапом проектирования любой системы электроснабжения. Значения электрических нагрузок определяют выбор всех элементов проектируемой системы электроснабжения. От правильной оценки ожидаемых нагрузок зависят капитальные затраты, расход цветного металла, потери электроэнергии и эксплуатационные расходы.

Основные определения и обозначения

Номинальная мощность электроприемника – эта мощность, обозначенная на заводской табличке или в паспорте двигателя, силового или специального трансформатора, либо на цоколе или колбе источников света. Под номинальной мощностью электродвигателя понимается мощность P_n ,

развиваемая двигателем на валу при номинальном напряжении, а под номинальной мощностью других приемников энергии – потребляемая ими из сети мощность при номинальном напряжении, определенных условиях среды и том режиме работы, для которых они предназначены.

Номинальная мощность приемников всегда приводится к нагрузке длительного режима их работы.

Паспортная мощность приемников повторно-кратковременного режима приводится к номинальной длительной мощности при продолжительности включения ПВ=100% по следующим формулам

для электродвигателей

$$P_{ном} = P_{пасп.} \sqrt{ПВ_{пасп.}} ;$$

для трансформаторов

$$S_{ном} = S_{пасп.} \sqrt{ПВ_{пасп.}} ,$$

где $P_{пасп.}$ (кВт); $S_{пасп.}$ (кВА);

$ПВ_{пасп.}$ – относительная продолжительность включения приемника;

для трансформаторов электрических печей

$$P_{ном} = S_{пасп.} \cos \varphi_{пасп.},$$

где $\cos \varphi_{пасп.}$ – номинальный коэффициент мощности трансформатора электрических печей.

Для трансформаторов сварочных машин и трансформаторов ручной сварки номинальная активная мощность – эта некоторая условная мощность, приведенная к ПВ=100%.

$$P_{ном} = S_{пасп.} \sqrt{ПВ} \cos \varphi_{пасп.}$$

Применительно к агрегатам с многодвигательным приводом, кроме крановых установок, под термином «приемник электроэнергии» следует понимать весь агрегат в целом, а под его номинальной мощностью – сумму номинальных мощностей всех двигателей агрегата, приведенных к ПВ=100%.

Для крановых установок под термином «приемник электроэнергии» следует иметь в виду электропривод каждого механизма, включая приводимые двумя двигателями, мощности которых складываются.

Групповая номинальная активная мощность – это сумма номинальных (паспортных) активных мощностей отдельных рабочих приемников

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^n P_{ном i} .$$

Под номинальной реактивной мощностью приемника понимается реактивная мощность, потребляемая из сети (знак плюс) или отдаваемая в сеть (знак минус) при номинальной активной мощности и номинальном напряжении, а для синхронных двигателей – при номинальном токе возбуждения при номинальном коэффициенте мощности.

Групповая номинальная реактивная мощность – это алгебраическая сумма номинальных реактивных мощностей отдельных рабочих приемников

$$Q_{ном} = \sum_{i=1}^n q_{ном i} .$$

Средние нагрузки

Среднее значение изменяющейся величины является ее основной статистической характеристикой, следовательно, постоянные осредненные значения нагрузки характеризуют графики переменных нагрузок. Суммарная средняя нагрузка всех приемников электроэнергии группы дает возможность приближенно оценить нижний предел возможных значений расчетных нагрузок. Средние активная и реактивная мощности приемника за любой интервал времени в общем виде определяются из выражений

$$p_c = \frac{\int_0^t p dt}{t} ; \quad q_c = \frac{\int_0^t q dt}{t} .$$

Средняя активная (или реактивная) мощность группы приемников равна сумме средних активных (или реактивных) мощностей отдельных рабочих приемников, входящих в данную группу

$$P_c = \sum_{i=1}^n p_{c,i} ; \quad Q_c = \sum_{i=1}^n q_{c,i} .$$

Средние нагрузки за максимально загруженную смену обозначаются $P_{см}$ и $Q_{см}$; за год $P_{сг}$ и $Q_{сг}$, где $P_{см}=W_{см}/T_{см}$; $Q_{см}=V_{см}/T_{см}$; $P_{сг}=W_{г}/T_{г}$; $Q_{сг}=V_{г}/T_{г}$.

Величины $P_{см}$ и $Q_{см}$ являются основной величиной при расчете нагрузок групп приемников. Наиболее загруженной сменой является смена с наибольшим потреблением энергии данной группы приемников, цехом или предприятием в целом для характерных суток (22 июня и 22 декабря – сутки с наименьшим и наибольшим потреблением электроэнергии).

Среднеквадратичные нагрузки

Среднеквадратичные нагрузки $P_{ск}$, $Q_{ск}$, $I_{ск}$ за любой интервал времени в общем виде определяются из следующих выражений

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} ; \quad Q_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Q^2(t) dt} ; \quad I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} ,$$

где T – рассматриваемый период времени.

Максимальные нагрузки

Максимальные значения активной мощности p_m , P_m , реактивной мощности q_m , Q_m , полной мощности s_m , S_m и тока i_m , I_m представляют собой наибольшие из соответствующих средних величин за некоторый промежуток времени. Максимальные нагрузки характеризуются ожидаемой частотой появления за тот или иной период времени.

По продолжительности различают два вида максимальных нагрузок:

а) максимальные длительные нагрузки различной продолжительности (10, 15, 30, 60, 120 мин), определяемые для выбора элементов системы электроснабжения по нагреву и расчета максимальных потерь мощности в них;

б) максимальные кратковременные нагрузки (пиковые) длительностью 1-2 с, необходимые для проверки размаха изменений напряжения в сетях, определения потерь напряжения в контактных сетях, проверки сетей по условиям самозапуска электродвигателей, выбора плавких вставок предохранителей, расчета тока срабатывания максимальной токовой релейной защиты.

Расчетные нагрузки

Под расчетной нагрузкой по допустимому нагреву понимается такая длительная неизменная нагрузка элемента системы электроснабжения (трансформатора, линии и т.п.), которая эквивалентна ожидаемой изменяющейся нагрузке по наиболее тяжелому тепловому воздействию: максимальной температуре нагрева проводника или тепловому износу его изоляции.

Эффекты нагрева проводника обусловлены его токовой нагрузкой, но вследствие большей простоты получения из опыта и использования в расчетах графиков $P=f(t)$ по сравнению с графиками $I=f(t)$ в проектной

практике широко применяется понятие расчетной нагрузки P_p по активной мощности.

Понятие о максимуме средней нагрузки.

Средняя мощность потерь в проводнике, а следовательно, и его средний перегрев определяется среднеквадратичным током I_{ck} ; средний перегрев меньше максимального перегрева проводника, кроме случая неизменной во времени нагрузки, когда перегрев одинаков. В общем случае можно записать

$$I_m \geq I_p \geq I_{ck} \geq I_c,$$

где I_m – наибольшее значение тока на данном графике.

Аналогично для графика нагрузок по активной мощности имеет место неравенство

$$P_m \geq P_p \geq P_{ck} \geq P_c.$$

Это неравенство дает достаточную, но обычно слишком грубую оценку расчетной нагрузки P_p . Более точная оценка величины P_p достигается с помощью использования понятия максимума средней нагрузки $P_{m,T}$ за скользящий вдоль графика интервал времени T .

Существует оптимальная длительность интервала осреднения $T_{оср}$, при которой средняя нагрузка $P_{с,Т}$ будет достаточно характеризовать изменение нагрева проводника за время $T_{оср}$. Длительность интервала осреднения не должна быть очень мала, так как иначе не успеет установиться режим нагрева проводника. Но она не должна быть слишком велика, так как в этом случае внутри некоторого интервала этой большой длительности даже при меньшей средней нагрузке возможен значительный пик графика, который успеет вызвать больший перегрев проводника, чем в другом таком же интервале с большей средней нагрузкой, но и более равномерным графиком.

Исходя из этих условий, оптимальная длительность интервала осреднения $T_{оср}$ принята равной трем постоянным времени нагрева

проводника T_o , т.е. $T_{\text{оср}} = 3T_o$, так как за это время перегрев проводника при неизменной нагрузке достигает примерно 95% установившегося значения.

Таким образом, максимальная средняя нагрузка за интервал времени $T_{\text{оср}} = 3T_o$ принимается в качестве расчетной нагрузки, $P_p \approx P_m$.

Итак, в качестве расчетной нагрузки P_p по допустимому нагреву при переменном графике нагрузок принимаются максимальные нагрузки различной продолжительности (0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5 ч), а при мало изменяющемся (постоянном) графике нагрузок – средняя нагрузка.

Лекция № 4. Показатели, характеризующие приемники электроэнергии и графики их нагрузок

Содержание лекции:

- изучение коэффициентов и характерных показателей электроприемников.

Цели лекции:

- уметь правильно использовать показатели в расчетах нагрузок.

При расчетах и исследовании нагрузок применяются некоторые безразмерные показатели (коэффициенты) графиков нагрузок, характеризующие режим работы приемников электроэнергии по мощности или во времени.

-

Коэффициент использования

Коэффициент использования является основным показателем для расчета нагрузки.

Коэффициентом использования активной мощности приемника электроэнергии $\kappa_{и.а.}$ или группы приемников $K_{и.а.}$ называется отношение средней активной мощности отдельного приемника (или группы их) к ее номинальному значению

$$\kappa_{и.а.} = \frac{P_c}{P_{ном}} ; \quad K_{и.а.} = \frac{P_c}{P_{ном}} = \frac{\sum_1^n \kappa_{и.а.} \cdot P_{ном}}{\sum_1^n P_{ном}} .$$

Этот коэффициент, как и средняя нагрузка p_c , P_c относится к смене с наибольшей загрузкой приемников.

Для графика нагрузок по активной мощности средний коэффициент использования активной мощности приемника за смену может быть определен из выражения

$$\kappa_{и.а.} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + \dots + P_n t_n}{P_{ном} (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n + t_{пауз})} = \frac{W_a}{W_{a,возм}} , \text{ (см. рисунок 3)}$$

где W_a – энергия, потребленная приемником за смену; $W_{a,возм}$ – энергия, которая могла бы быть потреблена (возможная) приемником за смену при номинальной загрузке его в течение всей смены.

Коэффициент включения

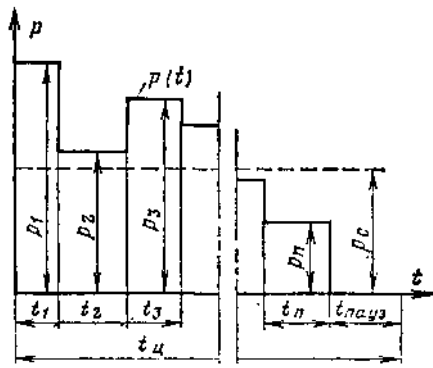


Рисунок 7 – Индивидуальный график нагрузок по активной мощности

Коэффициентом включения приемника $K_в$ называется отношение продолжительности включения в цикле $t_в$ ко всей продолжительности цикла $t_ц$.

Время включения приемника за цикл складывается из времени работы t_p и времени холостого хода t_x

$$K_в = \frac{t_в}{t_ц} = \frac{t_p + t_x}{t_ц}$$

Коэффициентом включения группы приемников или групповым коэффициентом включения $K_в$ называется средневзвешенное (по номинальной активной мощности) значение коэффициентов включения всех приемников, входящих в группу, определяемое по формуле

$$K_в = \frac{\sum_{i=1}^n K_{вi} \cdot P_{номi}}{\sum_{i=1}^n P_{номi}}$$

Для графика нагрузок по активной мощности коэффициент включения определяется из выражения

$$K_в = \frac{t_p}{t_ц} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n + t_{пауз}}$$

Коэффициент загрузки

Коэффициентом загрузки приемника по активной мощности $K_{з,а}$ называется отношение фактической потребляемой им средней активной

мощности $p_{с,в}$ за время включения $t_в$ в течение времени цикла $t_ц$ к его номинальной мощности

$$\kappa_{з,а} = \frac{p_{с,в}}{p_{ном}} = \frac{1}{p_{ном}} \cdot \frac{1}{t_в} \int_0^{t_у} p(t) dt = \frac{p_c}{p_{ном}} \cdot \frac{t_у}{t_в} = \frac{\kappa_{у,а}}{\kappa_в}.$$

Групповым коэффициентом загрузки по активной мощности называется отношение группового коэффициента использования $\kappa_{и,а}$ к групповому коэффициенту включения $\kappa_в$

$$K_{з,а} = \frac{K_{и,а}}{K_в}.$$

Коэффициент загрузки, как и коэффициент включения, связан непосредственно с технологическим процессом и изменяется с изменением режима работы приемника.

Коэффициент загрузки для графика нагрузки (рисунок 3) определяется из выражения

$$\kappa_{з,а} = \frac{p_1 \cdot t_1 + p_2 \cdot t_2 + p_3 \cdot t_3 + \dots + p_n \cdot t_n}{p_{ном}(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n)},$$

и показывает степень использования мощности приемника за рабочее время, т.е. за время включения.

Можно получить следующее соотношение

$$K_{и,а} = K_в \cdot K_{з,а}.$$

Коэффициент формы графика нагрузок

Коэффициентом формы графика нагрузок $\kappa_{ф,л}$, $K_{ф,л}$ называется отношение среднеквадратичного тока (или среднеквадратичной полной мощности) приемника или группы приемников за определенный период времени к среднему значению его за тот же период времени

$$\kappa_{\phi,I} = \frac{i_{ск}}{i_c} = \frac{S_{ск}}{S_c} ; \quad K_{\phi,I} = \frac{I_{ск}}{I_c} = \frac{S_{ск}}{S_c} ,$$

или по активной и реактивной мощности

$$\kappa_{\phi,a} = \frac{P_{ск}}{P_c} ; \quad K_{\phi,a} = \frac{P_{ск}}{P_c} ;$$

$$\kappa_{\phi,p} = \frac{Q_{ск}}{Q_c} ; \quad K_{\phi,p} = \frac{Q_{ск}}{Q_c} .$$

Коэффициент формы характеризует неравномерность графика во времени; свое наименьшее значение, равное единице, он принимает при нагрузке, неизменной во времени.

$K_{\phi,a}$ для большинства предприятий с ритмичным процессом производства изменяется в пределах от 1,05 до 1,15.

Коэффициент максимума

Коэффициентом максимума активной мощности $K_{м,a}$, $K_{м,a}$ называется отношение расчетной активной мощности p_p , P_p к средней нагрузке p_c , P_c за исследуемый период времени

$$\kappa_{м,a} = \frac{p_p}{p_c} ; \quad K_{м,a} = \frac{P_p}{P_c} .$$

Исследуемый период времени принимается равным продолжительности наиболее загруженной смены.

Коэффициент максимума активной мощности $K_{м,a}$ приближенно можно представить функцией $n_э$ и $K_{и,a}$ (рисунок 8).

Кривые построены для $T_o=10$ минут, т.е. при длительности интервала осреднения $T_{оср}=3T_o=30$ минут (получасовой максимум). Для проводников больших сечений этот интервал не соответствует.

Поэтому при $T_o \gg 10$ минут определенный по этим кривым K_m должен быть пересчитан на другую продолжительность по формуле

$$K_{M,a,T} = 1 + \frac{K_{M,a} - 1}{\sqrt{2T}},$$

где $K_{M,a}$ принят при $T_{оср}=30$ минут.

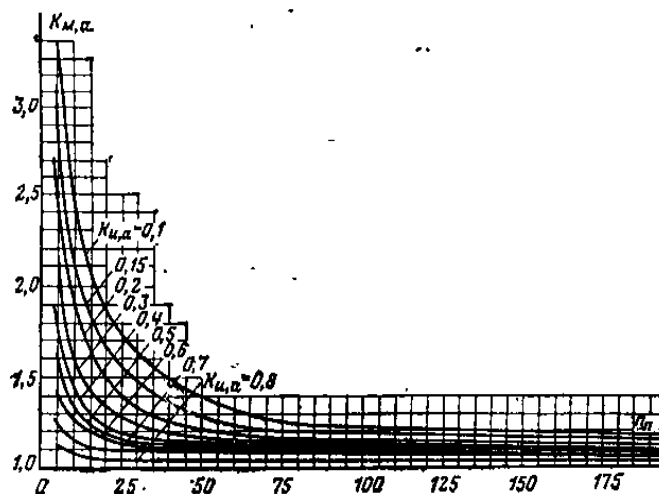


Рисунок 8 – Кривые для определения $K_M = f(K_u \text{ и } n_3)$

Коэффициент спроса

Коэффициентом спроса по активной мощности $K_{с,а}$ называется отношение расчетной P_p мощности к номинальной (установленной) мощности группы приемников

$$K_{с,а} = \frac{P_p}{P_{ном}}$$

Значения K_c для различных групп приемников в различных отраслях промышленности принимаются при проектировании по справочным данным.

Можно установить следующие зависимости

$$K_{с,а} = \frac{P_p}{P_{ном}} \cdot \frac{P_c}{P_c} = K_{u,a} \cdot K_{M,a}$$

В справочных материалах величины $K_{с,а}$ постоянны и не зависят от числа приемников группы, т.е. в них дается лишь грубая оценка величины $K_{с,а}$, которая может быть постоянной только при высоких $K_{и,а}$ и большом n .

Коэффициент заполнения графика нагрузок (коэффициент нагрузки)

Коэффициентом заполнения графика нагрузок по активной мощности $K_{з.г,а}$ называется отношение средней активной мощности к максимальной за исследуемый период времени

$$K_n = K_{з.г,а} = \frac{P_c}{P_m} = \frac{1}{K_{м,а}}.$$

Исследуемый период времени принимается равным продолжительности наиболее загруженной смены.

Числовые значения $K_{з.г,а}$ при проектировании принимаются по справочным материалам.

Коэффициент разновременности максимумов нагрузок

Коэффициентом разновременности максимумов нагрузок по активной мощности называется отношение суммарного расчетного максимума активной мощности узла системы электроснабжения к сумме расчетных максимумов активной мощности отдельных групп приемников, входящих в данный узел системы электроснабжения

$$K_{р.м.а.} = \frac{P_p}{\sum_1^n P_{p,i}}.$$

Этот коэффициент характеризует смещение максимумов нагрузок отдельных групп приемников во времени, что вызывает снижение суммарного максимума нагрузок узла по сравнению с суммой максимумов отдельных групп. Коэффициент $K_{р.м,а} \leq 1$ применяется при ориентировочных расчетах. Значение его определяется отраслевыми инструкциями в

зависимости от местных условий. Приближенно можно принять $K_{p.m,a} = 0,85 \div 1,0$, для линий напряжением выше 1кВ системы внутреннего электроснабжения предприятия и $K_{p.m,a} = 0,95 \div 1,0$ для шин электростанций предприятия, шин ГПП и питающих ЛЭП (внешнее электроснабжение).

Коэффициент сменности по энергоиспользованию за год

$$\alpha = \frac{W_{\Gamma}}{P_{cm} \cdot T_{\Gamma}} = \frac{W_{\Gamma}}{P_p \cdot K_n}, \quad \alpha < 1$$

W_{Γ} – расход электроэнергии за год;

$$W_{\Gamma} = P_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma};$$

T_{Γ} – годовой фонд рабочего времени.

$$\alpha = \frac{P_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma}}{P_{cm} \cdot T_{\Gamma}} = \frac{P_{\Gamma}}{P_{cm}}.$$

Определение приведенного (эффективного) числа приемников

Под эффективным (приведенным) числом приемников группы различных по номинальной мощности и режиму работы понимается такое число однородных по режиму работы приемников одинаковой мощности, которое обуславливает ту же расчетную нагрузку, что и данная рассматриваемая группа различных по номинальной мощности и режиму работы приемников.

Приведенное число приемников группы определяется по формуле

$$n_{\text{э}} = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{\text{ном},i})^2}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном},i}^2} = \frac{P_{\text{ном}}^2}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном},i}^2},$$

где в числителе стоит квадрат суммы номинальных активных мощностей всех приемников (т.е. квадрат групповой мощности) данной

группы, а в знаменателе – сумма квадратов номинальных активных мощностей отдельных приемников группы. Подробно способы определения n_3 приведены ниже.

Лекция № 5. Определение электрических нагрузок различными методами

Содержание лекции:

- определение средних и расчетных нагрузок.

Цели лекции:

- методы (вспомогательные и основные) расчета нагрузок.

Определение средних нагрузок

Средняя активная мощность за наиболее загруженную смену какой-либо группы силовых приемников с одинаковым режимом работы определяется путем умножения суммарной номинальной мощности группы рабочих приемников $P_{ном}$, приведенной для приемников ПКР к ПВ=100%, на их групповой коэффициент использования $K_{и,а}$

$$P_{см} = K_{и,а} \cdot P_{ном}.$$

Средняя реактивная мощность за наиболее загруженную смену $Q_{см}$ для какой-либо группы силовых приемников (с отстающим током) одинакового режима работы определяется следующим образом

$$а) Q_{см} = K_{и,р} \cdot Q_{ном};$$

$$б) Q_{см} = P_{см} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Реактивные нагрузки приемников с опережающим током (СД, БК) принимаются со знаком минус.

Средняя активная мощность за наиболее загруженную смену $P_{см}$ узла системы электроснабжения, включающего какое-либо количество групп приемников с разными режимами работы

$$P_{см} = \sum_{i=1}^n P_{см.i}$$

Средняя реактивная мощность узла нагрузки

$$Q_{cm} = \sum_{i=1}^n Q_{cmi} - (\sum_{i=1}^n Q_{cm.cд.i} + Q_{cm.бк}) ,$$

где $Q_{cm,i}$ – средняя реактивная мощность за наиболее загруженную смену i -й группы приемников с отстающим током;

n – число групп приемников с отстающим током с разными режимами работы, входящих в данный узел;

$Q_{cm.cд.i}$ – средняя реактивная мощность синхронных двигателей за наиболее загруженную смену;

$Q_{cm.бк}$ – то же, для конденсаторов.

Среднегодовая мощность, потребляемая цехом, находится из соотношений

$$P_{cr} = \frac{W_{a.э.}}{T_{г}} ; \quad Q_{cr} = \frac{W_{p.э.}}{T_{г}} .$$

Определение расчетных нагрузок

В системе электроснабжения промышленного предприятия существует несколько характерных мест определения электронагрузок (см. рисунок 9).

1. Определение расчетной нагрузки, создаваемой одним приемником до 1000 В (нагрузка 1); необходимо для выбора сечения провода или кабеля, отходящего к данному приемнику, и аппарата, при помощи которого производится присоединение приемника к силовому распределительному шкафу или распределительной линии.

2. Определение расчетной нагрузки, создаваемой группой приемников до 1000 В (нагрузка 2). Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечений радиальных линий или распределительной магистрали, питающих данную группу приемников и аппарата присоединения данной группы приемников к главному силовому распределительному шкафу или питающей магистрали в схеме блока трансформатор – магистраль.

3. Определение расчетной нагрузки, создаваемой на шинах напряжения 0,69-0,4/0,23 кВ цеховой п/ст (ТП) отдельными крупными приемниками или силовыми распределительными шкафами, питающими отдельные приемники или группы приемников (нагрузка 3). Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения линий, отходящих от шин 0,69 или 0,4/0,23 кВ цеховой ТП и питающих указанные выше приемники, и аппаратов присоединения отходящих линий к шинам низшего напряжения цеховой ТП.

4. Определение расчетной нагрузки, создаваемой на шинах 6-20 кВ распределительных пунктов (РП) отдельными приемниками или отдельными цеховыми трансформаторами с учетом потерь в трансформаторах (нагрузка 4), необходимо для выбора сечения проводов линий, отходящих от шин РП и питающие цеховые трансформаторы и приемники высокого напряжения, и отключающих аппаратов, устанавливаемых на этих линиях.

5. Определение общей расчетной нагрузки на шинах каждой секции РП (нагрузка 5), необходимо для выбора сечения и материала шин 6-20 кВ РП, сечения линий, питающих каждую секцию шин РП, и отключающей аппаратуры со стороны шин ГПП. Если от шин 6-20 кВ ГПП непосредственно питаются цеховые трансформаторы или приемники, нагрузка 5 означает то же самое, что и нагрузка 4, только относительно шин 6-20 кВ ГПП.

6. Определение общей расчетной нагрузки на шинах 6-20 кВ каждой секции ГПП (нагрузка 6), необходимо для выбора числа и мощности понизительных трансформаторов, установленных на ГПП, выбора сечения и материала шин ГПП и отключающих аппаратов, устанавливаемых на стороне низкого напряжения 6-20 кВ трансформаторов ГПП.

7. Определение расчетной нагрузки на стороне высшего напряжения 35-220 кВ трансформатора ГПП с учетом потерь в трансформаторе, необходимо для выбора сечений линий, питающих трансформаторы ГПП, и аппаратов присоединения трансформаторов и питающих их линий.

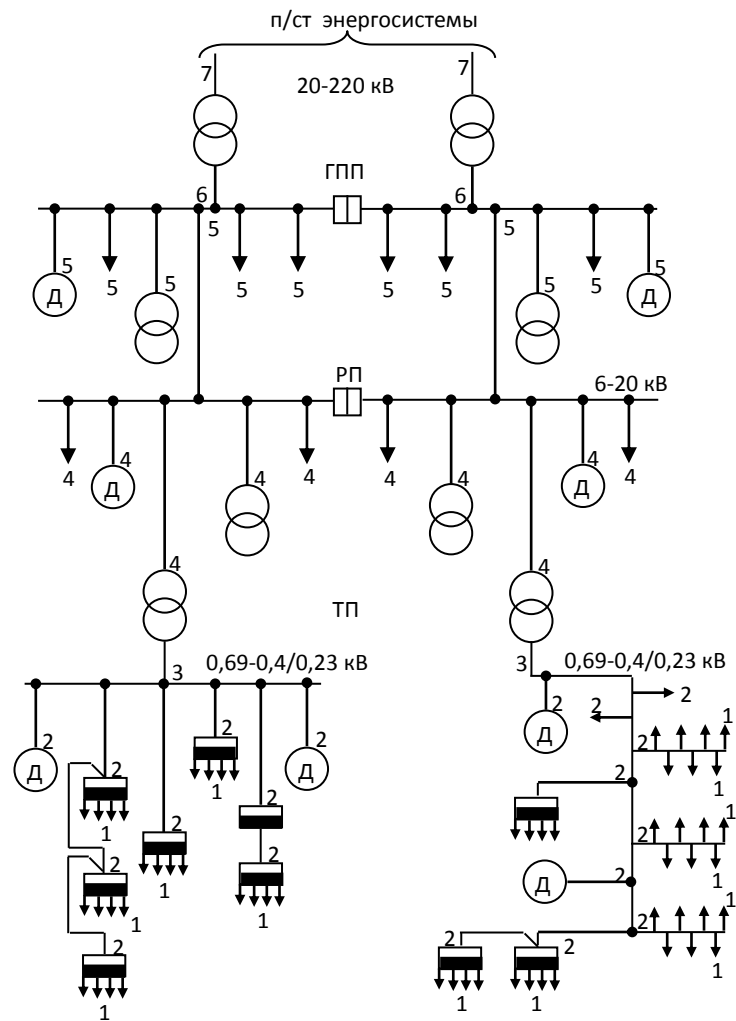


Рисунок 9 – Схематические места определения расчетных нагрузок в системе электроснабжения промышленного предприятия

Определение расчетных нагрузок

Существуют несколько методов определения расчетных нагрузок.

К основным следует отнести методы определения электронагрузок по:

- а) установленной мощности и коэффициенту спроса;
- б) средней мощности и коэффициенту максимума (метод упорядоченных диаграмм графиков нагрузки);
- в) средней мощности и коэффициенту формы графиков нагрузок;
- г) средней мощности и отклонению от средней расчетной нагрузки (статистический метод).

К вспомогательным можно отнести методы определения расчетных нагрузок по:

- а) удельному расходу электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период;
- б) удельной нагрузке на единицу производственной площади.

Определение расчетной нагрузки по установленной мощности и коэффициенту спроса

Расчетная нагрузка для группы однородных по режиму работы приемников определяется из следующих выражений

$$P_p = K_{к.с} \cdot P_{ном} ;$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi;$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \frac{P_p}{\cos \varphi},$$

где $K_{с.а}$ – коэффициент спроса данной характерной группы, принимаемый по справочным материалам;

$\operatorname{tg} \varphi$ соответствует характерному для данной группы приемников $\cos \varphi$, определяемому по справочным материалам.

Расчетная нагрузка узла СЭС (цеха, корпуса, предприятия) определяется суммированием расчетных нагрузок отдельных групп приемников

$$S_p = \sqrt{\left(\sum_1^n P_p\right)^2 + \left(\sum_1^n Q_p\right)^2} \cdot K_{p.м},$$

где $\sum_1^n P_p$ – сумма расчетных активных нагрузок отдельных групп приемников;

$\sum_1^n Q_p$ – то же, реактивных;

$K_{p.м}$ – коэффициент разновременности максимумов нагрузок, принимаемый 0,85÷1,0 в зависимости от места нахождения данного узла в СЭС.

Определение расчетной нагрузки по методу «Упорядоченных диаграмм нагрузок»

$$\begin{aligned} P_p &= P_{см} \cdot K_m; & P_{см} &= P_{ном} \cdot K_{и}; \\ Q_p &= \begin{cases} 1 \cdot Q_{см} - \text{при } n_{э} = n_n < 10; \\ Q_{см} - \text{при } n_{э} = n_n \geq 10. \end{cases} & Q_{см} &= P_{см} \cdot \operatorname{tg} \varphi \end{aligned}$$

K_m определяется по графикам или таблицам зависимости $K_m = f(n_{э}; K_{и})$.

Имеются методы упрощенного нахождения K_M и $n_э$:

1. Если $n_э \geq 200$, то при любых значениях K_M

$$P_p = P_{см.}$$

2. Если $K_M \geq 0,9$, то при любых значениях $n_э$

$$P_p = P_{см.}$$

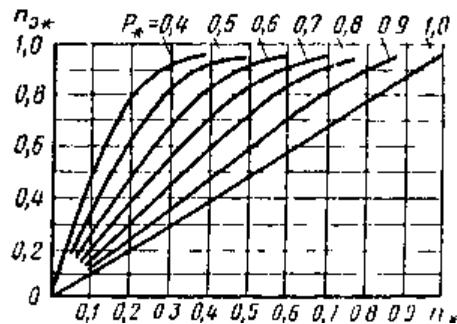
3. Если $n \geq 4$, то при $m = \frac{P_{н.макс}}{P_{н.мин}} \leq 3$

$n_э = n$ (n – фактическое число ЭП)

4. Если $n \geq 4$, то при $m > 3$ и $K_M \geq 0,2$

$$n_э = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_i}{P_{н.макс}}, \text{ если окажется, что } n_э > n, \text{ то принимаем } n_э = n$$

5. Если $n \geq 4$, то при $m > 3$ и $K_M < 0,2$ $n_э$ определяется по вспомогательным кривым:



Вводим следующие обозначения:

n – фактическое число ЭП в группе;

n_1 – число наибольших ЭП в группе, подключенных к узлу, мощность каждого из которых не менее половины мощности наибольшего электроприемника;

$\frac{n_1}{n}$
 n_* – относительное число наибольших ЭП;

P_{n1} – суммарная мощность n_1 ЭП;

P_n – суммарная номинальная мощность n ЭП узла;

$\frac{P_{n1}}{P_n}$
 P_* – относительная мощность наибольших ЭП.

зная n_* и P_* определяем по кривым $n_{э*}$

$$\frac{n_{э}}{n} = \frac{n_{э*}}{n} \Rightarrow n_{э} = n_{э*} \cdot n.$$

6. Если $n \leq 3$, то $P_p = \sum P_n$

при ПКР: $Q_p = 0,87P_p$; для ЭП длительного режима $Q_p = 0,75P_p$

7. Если $n > 3$, но $n_{э} < 4$, то $P_p = \sum (P_n \cdot K_3)$

8. Для ЭП длительного режима при $k_{и} \geq 0,6$, $k_{и} \geq 0,9$

$$K_M = 1; P_p = P_{см}.$$

Определение расчетной нагрузки по средней мощности и коэффициенту формы

$$P_p = K_{ф.а} \cdot P_{см},$$

$$Q_p = K_{ф.р} \cdot Q_{см} \text{ или } Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

В этом методе $P_{см}$ можно определить

$$P_{см} = P_n \cdot K_{и} \text{ или } P_{см} = \frac{M_{см} \cdot \omega_a}{T_{см}},$$

где $M_{см}$ – производительность за максимально загруженную смену;

ω_a – удельный расход электроэнергии на единицу продукции.

Определение расчетной нагрузки по удельному расходу электроэнергии на единицу продукции

$$W_r = M_r \cdot \omega_{уд},$$

M_r – годовой выпуск продукции, шт, м, т, м²;

$\omega_{уд}$ – удельный расход электроэнергии, $\frac{кВт.ч}{ед.прод}$;

$P_{cr} = \frac{W_r}{T_r}$, кВт, где P_{cr} – среднегодовая мощность нагрузки; T_r – годовой фонд рабочего времени, ч.;

$P_p = \frac{P_{cr}}{\alpha}$, кВт; α - коэффициент сменности по энергоиспользованию, $\alpha \cong 0,5 \div 0,9$.

Определение расчетной нагрузки по удельной нагрузке на единицу производственной площади

$$P_p = \rho_o \cdot F,$$

где F – площадь размещения приемников группы, м²;

ρ_o – удельная расчетная мощность на 1 м² производственной площади, кВт/м².

Метод применим для сетей цехов, в которых приемники имеют малую мощность и они равномерно распределены на производственной площади.

Удельная расчетная мощность для силовых электроприемников определяется по справочным материалам и лежит в пределах 0,15÷1,5 А/м² или 0,1÷1,0 кВт/м².

Для осветительной нагрузки $\rho_{\text{осв}}=0,01\div0,02$ кВт/м² при освещении лампами накаливания; $0,009\div0,018$ кВт/м² при освещении люминесцентными лампами, $0,005\div0,01$ кВт/м² при освещении газоразрядными лампами без компенсации реактивной мощности и $0,009\div0,018$ кВт/м² при освещении газоразрядными лампами с компенсацией реактивной мощности.

Список литературы

1. . Электроснабжение и электрооборудование цехов / В. И. Григорьев, Э. А. Киреева, В. А. Миронов, А. Н. Гохонелидзе. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 246с. 31.
2. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / ред. А. Ф. Дьяков. – М.: Мир; Энергоатомиздат, 2003. – 768 с. 29.
3. Мельников М.А. Внутрицеховое электроснабжение: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с