

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Погребняк Н.Н.

Донецкий национальный технический университет

Рассматриваются направления дальнейшего развития теории электрических нагрузок: актуальность, уточнение понятия расчетной нагрузки, оценивание тепловых эффектов, компьютерная имитация.

Проблема расчета электрических нагрузок имеет экономическую основу: занижение нагрузок приводит к ущербу от сокращения срока службы проводников и ухудшения качества напряжения, а завышение – к необоснованному увеличению капитальных затрат на систему электроснабжения.

Ранее проектные организации поддерживали создание теоретически обоснованных методов расчета («Тяжпромэлектропроект», Большам Я.М., Ермилов А.А., Каждан Э.М.), так как государство добивалось снижения сметной стоимости проектов электроснабжения. В нынешних условиях нет директивного давления, поэтому по ряду причин (перестраховка, экономия на сборе информации, сознательное завышение стоимости) недальновидные проектировщики могут быть заинтересованы в необоснованном увеличении нагрузок – все равно расходы оплачивает заказчик. Предельное выражение такой позиции – полное отрицание необходимости расчета нагрузок.

На наш взгляд, методы расчета нагрузок должны развиваться и сейчас. Во-первых, в условиях свободной конкуренции удешевление проектов помогает привлечь заказчиков и, во-вторых, заказчик может проконтролировать сметную стоимость системы электроснабжения¹.

Перейдем к самим методам расчета, цели которых могут быть различными: оценка одномоментных потерь напряжения и доз фликера [1], проверка проводников по нагреву, определение характеристик выбросов и др. Для краткости рассмотрим лишь определение расчетной нагрузки по нагреву от группы электроприемников, питаемых кабелем.

Как известно, вначале использовались эмпирические методы расчета: коэффициент спроса (Копытов Н.В.), двучленной формулы (Лившиц Д.С.), удельной площади (Мукосеев Ю.Л.). В них под расчетной нагрузкой понимался получасовой максимум, который, к сожалению, сохранился в ПУЭ и до сих пор.

Основы теории электрических нагрузок были заложены Каяловым Г.М. Они включают два принципиальных положения: во-первых, исходными данными служат характеристики индивидуальных нагрузок и, во-вторых, расчетная нагрузка должна определяться по эффектам нагревания проводников,

¹ Нам известен случай, когда западная фирма предложила проект электроснабжения предприятия в одной из стран Африки. Выпускник ДПИ рассчитал нагрузки по действующей в СССР методике и доказал существенное завышение сметной стоимости. Фирма согласилась уменьшить эту стоимость.

а не получасовому максимуму, который не имеет физического смысла². Этим положениям полностью отвечает «метод вероятностного моделирования» [2, гл. 8], оценивающий нагрев как по температуре ϑ_{\max} максимального перегрева, так и по тепловому износу. Однако из-за отсутствия исходных данных Каяловым Г.М. был разработан метод упорядоченных диаграмм (УД) [2, гл. 4], в котором вместо группового графика нагрузки использовалась его спрямленная УД.

Не останавливаясь на всех причинах завышения нагрузок по методу УД, отметим, что одной из них является использование не среднестатистических, а максимальных значений индивидуальных коэффициентов использования. Корректировка расчетных кривых привела к замене метода УД на «модифицированный статистический» метод [3], который действует и сейчас. Корректировка выполнена сугубо эмпирически, поэтому этот метод нельзя считать достаточно обоснованным, о чем, в частности, свидетельствует сам вид расчетных кривых, имеющих необъяснимые нарушения монотонности убывания. Метод «греющих доз» [4] устраняет этот недостаток, но только в рамках традиционного представления о понятии расчетной нагрузки по нагреву.

Развитие методов расчета нагрузок должно идти по пути перехода к непосредственным оценкам по нормируемым показателям: длительно допустимой температуре ϑ_N , допустимой температуре $\vartheta_{N\max}$ максимального перегрева и длительно допустимому току I_N . На примере расчетной нагрузки $I_{p\vartheta}$ по пику температуры покажем, что именно такой подход исключает значительное завышение результатов расчета.

В самом деле, обычно исходят из допущения об единой расчетной нагрузке. Для его реализации приходится принимать одну постоянную времени нагрева $T=10$ мин или один интервал осреднения 30 мин – в ПУЭ. В методе УД дополнительно принято единое значение 1,5 допустимой кратности перегрева

$$\rho = \vartheta_{N\max} / \vartheta_N \cdot \quad (1)$$

Кабели имеют постоянные времени нагрева, превышающие 10 мин, поэтому расчетная нагрузка, которая определена для 10 мин, завышает перегрев. Не случайно предложены формулы пересчета к фактическим постоянным времени нагрева, но они относятся только к частным случаям нагрузок определенного вида (п. 4.7 в [5]).

В табл. 2.72 из [6] для кабелей 6 кВ указано одно значение $\vartheta_N=65^\circ\text{C}$ и три значения 200, 150 и 120°C максимальной температуры для разных видов изоляции. Им соответствуют значения кратности перегрева от 1,85 до 3,08. Современные кабели с изоляцией из шитого полиэтилена допускают значе-

² Для формального преодоления противоречия с ПУЭ в [2] принято некорректное допущение об эквивалентности оценок по получасовому максимуму и по тепловым эффектам нагрева проводника с постоянной времени нагрева 10 мин.

ния $\vartheta_N=90$ и $\vartheta_{N\max}=250^\circ\text{C}$. В этом случае $\rho=2,78$. Следовательно, допущение $\rho=1,5$ также приводит к завышению расчетной нагрузки.

Выясним, каким образом можно определить расчетную нагрузку. По смыслу задачи при оценке максимального перегрева будем исходить из условия

$$\vartheta_{\max} \leq \vartheta_{N\max} . \quad (2)$$

Для расчета температуры необходимо знать тепловую модель кабеля. Ограничимся для простоты традиционным представлением кабеля в виде однородного тела с нулевым внутренним тепловым сопротивлением. В этом случае процессы $\vartheta(t)$ изменения температуры и $I(t)$ тока связаны дифференциальным уравнением

$$T\vartheta' + \vartheta = c_{\vartheta}I^2 , \quad (3)$$

где передаточный коэффициент [2]

$$c_{\vartheta} = \vartheta_N / I_N^2 \quad (4)$$

учитывает сечение, вид изоляции кабеля, а также способ его прокладки.

Для того, чтобы ввести понятие расчетной нагрузки по пику температуры, необходимо перейти к «энергетическому» инерционному процессу

$$w(t) = \vartheta(t) / c_{\vartheta} ,$$

который пропорционален температуре, но уже связан только с током. Максимальное значение $w_{T\max}$ этого процесса дает искомую температуру

$$\vartheta_{\max} = c_{\vartheta} w_{\vartheta\max} . \quad (5)$$

Подставив выражения (5) и (4) в (2), получим условие

$$w_{T\max} \leq \rho I_N^2 . \quad (6)$$

Расчетная нагрузка должна сравниваться с допустимым током:

$$I_{p\vartheta} \leq I_N . \quad (7)$$

Из сопоставления (6) и (7) следует, что расчетная нагрузка по пику температуры определяется выражением

$$I_{p\vartheta} = \sqrt{w_{T \max} / \rho}. \quad (8)$$

При таком подходе одному графику нагрузки будут отвечать разные расчетные нагрузки, если выбираются кабели с разными кратностями перегрева.

Поскольку до выбора проводника его сечение и постоянная времени еще не известны, но известна кратность перегрева, расчеты надо выполнять для значения постоянной времени от нуля до бесконечности, получая T -характеристику: зависимость расчетной нагрузки от постоянной времени нагрева при заданном значении ρ . Геометрически неравенству (7) отвечают все ординаты T -характеристики ниже горизонтали I_N .

Перейдем к оценке теплового износа, который определяется средней температурой

$$\vartheta_c = c_{\vartheta} I_{\vartheta}^2,$$

где I_{ϑ} - эффективный ток. Эта температура не должна быть больше ϑ_N , что с учетом (4) равносильно условию

$$I_{\vartheta} \leq I_N. \quad (9)$$

Отсюда следует, что расчетная нагрузка I_{p_z} по тепловому износу совпадает с эффективным током³. В отличие от $I_{p\vartheta}$ она является единственной для кабелей с разной изоляцией.

В расчетах принимается наибольшая из величин $I_{p\vartheta}$ или I_{p_z} . Как следует из (8), учет фактических значений ρ , превышающих 1,5, ведет к тому, что в большинстве случаев определяющим будет простое условие (9). Разграничение областей применимости расчетных нагрузок по пику температуры и тепловому износу является одним из направлений развития теории электрических нагрузок.

Отмеченная некорректность средней расчетной нагрузки означает, что из ПУЭ необходимо исключить не только понятие получасового максимума, но и само понятие расчетной нагрузки: следует лишь записать, что в любых режимах работы показатели нагрева проводников не должны превышать допустимых значений.

Одной из важных задач в рассматриваемой области является создание компьютерного банка данных показателей индивидуальных нагрузок, которые могут быть получены из технологических расчетов или в действующих сетях. Состав данных определяется принятой методикой расчетов. Без достоверной исходной информации нельзя обеспечить достоверность расчета нагрузок.

³ В [2] расчетная нагрузка по тепловому износу определялась с учетом превышения нормального относительного износа. Такой подход представляется целесообразным принять для нормирования допустимых кратковременных перегрузок.

Дальнейшее развитие получают методы компьютерной имитации индивидуальных и групповых графиков электрических нагрузок – как для проверки корректности теоретических моделей, так и для получения новых закономерностей. Так, методы имитации позволили установить, что во многих случаях энергетический инерционный процесс, а следовательно и температура, подчиняются бета-распределению [4]. Однако пока не получены методы определения границ этого распределения по характеристикам индивидуальных нагрузок. Методы имитации взаимосвязанных процессов [7] позволяют оценивать погрешности допущения о независимости активных и реактивных нагрузок.

Развитие теоретических исследований не исключает, а наоборот – предполагает создание компьютерных методов расчета, не требующих от пользователя специальной подготовки, но обеспечивающих достоверность результатов.

Вывод. Развитие теории электрических нагрузок должно идти по пути отказа от некорректности упрощающих допущений путем перехода к оценкам по максимальному перегреву и тепловому износу с использованием тепловых моделей проводников.

Литература

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.1999.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.С. Мешель. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. Руководящий технический материал. Указания по расчету электрических нагрузок: РТМ 36.18.32.4-92. – Введен с 01.01.93 // Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. – 1992. – № 6-7. – С. 4-27.
4. Погребняк Н.Н. Решение задач электроснабжения путем имитации ансамбля реализаций случайных процессов // Сборник научных трудов Донецкого госуд. техн. университета: «Электротехника и энергетика», выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – С. 67-73.
5. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
7. Куренный Э.Г. Цыганкова Н.В. Имитация коррелированных случайных процессов в электрических сетях методом элементарных процессов // Труды Донецкого госуд. техн. Университета: «Электротехника и энергетика». – Донецк, 2000, выпуск 17. – С. 142-145.