

Определение трансформаторной мощности тяговых подстанций постоянного тока с учетом случайного характера тяговой нагрузки

Э. В. ТЕР-ОГАНОВ, канд. техн. наук, профессор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)



Один из важнейших параметров системы электроснабжения электрифицированных железных дорог — трансформаторная мощность тяговых подстанций. По расчетному значению трансформаторной мощности при заданном напряжении обмоток выбирается трансформатор определенной стандартной номинальной мощности. При оценке расчетного значения трансформаторной мощности, необходимой для питания любого потребителя, за основу принимаются протекающие в нем тепловые процессы. Под их воздействием имеет место потеря механической прочности изоляции обмоток трансформатора, определяющая срок его службы [1].

Трансформатор можно рассматривать как некий «черный ящик», на вход которого подаются некоторые возмущающие факторы, определяющие протекание тепловых процессов внутри него. На выходе фиксируется ряд показателей, изменяющихся во времени и обуславливающих состояние механической прочности изоляции обмоток (рис. 1).

Расчетное значение трансформаторной мощности определяется следующими критериями [2]:

- величиной относительного износа изоляции обмотки трансформатора, которая за весь срок его службы (в нашей стране принят 20 лет) должна равняться 1;
- допустимой максимальной температурой наиболее нагретой точки обмотки трансформатора (при нормальном режиме работы трансформатора 140 °С, при аварийном — 160 °С);
- допустимой максимальной температурой верхних слоев масла трансформатора (при нормальном режиме работы трансформатора 95 °С, а при аварийном — 115 °С).

При токе трансформатора, равном номинальному, перегрев обмотки над маслом равен 23 °С, а перегрев верхних слоев масла — 55 °С. Если температура

охлаждающей среды равна 20 °С, то температура наиболее нагретой точки обмотки принимается за равную номинальной и составляет 98 °С [2].

Температура наиболее нагретой точки обмотки $\Theta_{об}$ складывается из перегрева обмотки над маслом τ , верхних слоев масла над охлаждающей средой m_c и температуры охлаждающей среды $\Theta_{охл}$. Температура верхних слоев масла трансформатора Θ_{mc} равна сумме τ и $\Theta_{охл}$. Интенсивность старения изоляции обмотки определяется температурой обмотки. Температура охлаждающей

среды оценивается на основе предположения о ее синусоидальном изменении в течение суток [1].

В существующей методике расчета трансформаторной мощности, которая базируется на положениях и расчетных формулах, приведенных в [4, 5], указанные критерии учитываются косвенно для некоторых усредненных условий работы электрифицируемого участка. В процессе расчета температуры обмотки и масла и относительный износ изоляции обмотки непосредственно не определяются. Кроме того, режим сгущения поездов рассматривается после предоставления длительных «окон» для выполнения путевых ремонтных работ одновременно по обоим путям двухпутного участка, что не имеет места в эксплуатации. По данной методике были выполнены расчеты для реального двухпутного участка. Результаты приведены в табл. 1.

Чтобы выбрать трансформатор определенной номинальной мощности, надо выяснить режим работы понижа-

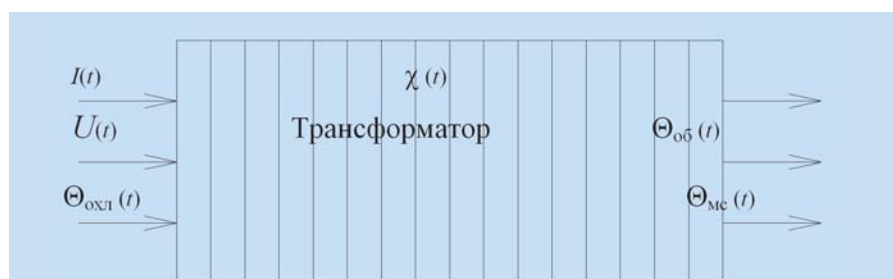


Рис. 1. Величины на входе и выходе трансформатора, позволяющие судить о его тепловом состоянии и старении изоляции обмотки

- $I(t)$ — токовая нагрузка трансформатора;
- $U(t)$ — напряжение, подаваемое на трансформатор;
- $\Theta_{охл}(t)$ — температура охлаждающей среды;
- $\chi(t)$ — интенсивность старения изоляции обмотки трансформатора;
- $\Theta_{об}(t)$ — температура наиболее нагретой точки обмотки;
- $\Theta_{mc}(t)$ — температура верхних слоев масла трансформатора.

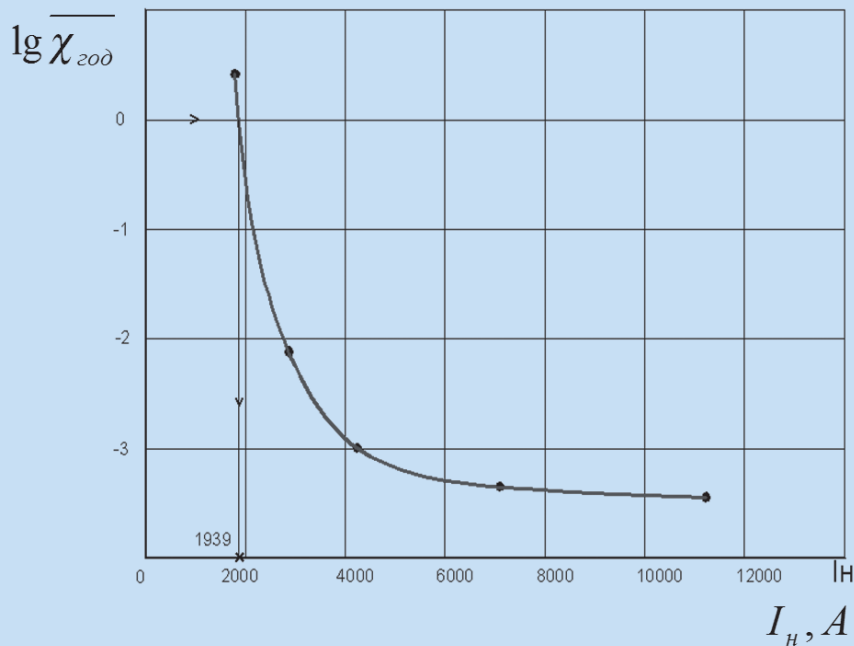


Рис. 2. Определение расчетного значения номинального тока трансформатора по старению изоляции для тяговой подстанции Ср

ла, которые по своему характеру случайны, представлены как случайные величины. Изменение их с течением времени не рассматривается, хотя это необходимо для правильной оценки максимальных значений температур обмотки и масла трансформатора, величины относительного износа изоляции обмотки. И в-четвертых, эта методика оказалась достаточно сложной для ее практического использования.

Предлагаемая здесь методика построена на непосредственной оценке значений температур наиболее нагретой точки обмотки и верхних слоев масла трансформатора и интенсивности старения изоляции обмотки, учете изменения их с течением времени и действительных условий эксплуатации. При использовании этой методики можно отказаться от условных схем движения поездов, статистических и эмпирических коэффициентов и рассмотреть формирование нагрузки, происходящей на трансформаторы, в соответствии с реальными условиями их эксплуатации.

Для реализации данной методики предлагается использовать ранее разработанную вероятностную имитационную модель работы системы электроснабжения двухпутного участка постоянного тока [8–10]. Всем вероятностным моделям присуща

ющих (головных) трансформаторов тяговых подстанций.

В настоящее время «Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог РФ» [6] однозначно не определяют режим работы понижающих трансформаторов, но с учетом пунктов 2.9 и 4.28 Правил можно предположить, что в работе находятся два трансформатора.

При определении расчетного значения номинальной мощности понижающих трансформаторов (с учетом возможной длительности систематической или аварийной перегрузок, равной по условиям эксплуатации 4–6 ч) коэффициент перегрузки [3] при работе одного трансформатора должен быть принят равным 1,25, двух трансформаторов — 1,4 (температура охлаждающей среды +20 °С).

Именно исходя из этого в табл. 1 указана стандартная номинальная мощность трансформаторов тяговых подстанций.

В свое время была предложена методика расчета необходимой трансформаторной мощности тяговых подстанций, основанная на непосредственной оценке температуры наиболее нагретой точки обмотки и верхних слоев масла трансформатора и относительного износа изоляции обмотки [7]. Но ее использование, во-первых, предполагает определение эффективных значений и дисперсий тока тяговых подстанций для различных режимов работы. При разнотипных поездах, обращающихся на участке, это трудно

сделать. Во-вторых, предлагаемые формулы для определения расчетных значений номинального тока трансформатора по максимально допустимой температуре обмотки и масла трансформатора и по величине относительного износа изоляции обмотки получены на основе некоторых допущений. В-третьих, температуры обмотки и мас-

Таблица 1. Результаты выбора стандартной номинальной мощности силовых понижающих трансформаторов для тяговых подстанций

Тяговая подстанция	Расчетное значение трансформаторной мощности, кВА	Число работающих трансформаторов	Расчетное значение номинальной мощности, кВА	Стандартная номинальная мощность трансформатора, МВА
Ср	13896	1	11117	16
		2	9926	10
Сб	19200	1	15360	16
		2	13714	16
Б	12952	1	10362	16
		2	9251	10
П	14936	1	11949	16
		2	10669	16
Х	19466	1	15573	16
		2	13904	16

Таблица 2. Среднее значение годового относительного износа изоляции обмоток трансформатора

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора, приведенный к напряжению 3,3 кВ, А	Тяговая подстанция				
	Ср	Сб	Б	П	Х
1769	2,69	10476064	15,68	182	3505377637
2808	0,007	1,99	0,066	0,027	51,3
4493	0,001	0,005	0,0032	0,003	0,021
7020	0,0005	0,001	0,00067	0,0063	0,0019
11232	0,0004	0,0005	0,00046	0,00011	0,0006

флуктуация результатов, получаемых на выходе, т. е. при проведении очередного испытания (эксперимента) полученные значения несколько отличаются от аналогичных значений, полученных в предыдущих испытаниях. Поэтому искомое значение интересующей величины находится как среднее по совокупности ее значений, полученных при проведении того или иного числа испытаний [11].

При оценке среднего значения относительного износа изоляции за год необходимо рассмотреть три временных режима работы тяговых подстанций: сутки весенне-летнего периода, период сгущения поездов, возникающий после длительных «окон», предоставляемых для капитального ремонта пути в весенне-летний период, и сутки осенне-зимнего периода [6].

Среднее значение относительного износа изоляции можно определить по формуле

$$\bar{\chi}_{\text{год}} = \frac{1}{365} \cdot (\bar{\chi}_{\text{в-л}} n_{\text{в-л}} + \bar{\chi}_{\text{сг}} n_{\text{сг}} + \bar{\chi}_{\text{о-з}} n_{\text{о-з}}), \quad (1)$$

где $\bar{\chi}_{\text{в-л}}, \bar{\chi}_{\text{сг}}, \bar{\chi}_{\text{о-з}}$ – соответственно средние значения относительного износа изоляции обмотки для суток весенне-летнего периода, в период сгущения поездов и для суток осенне-зимнего периода;
 n – число суток в течение года для указанных трех режимов работы трансформатора.

Продолжительность периода сгущения поездов после длительных «окон» определена в соответствии с рекомендациями и формулой [6]. Длительность «окна» в соответствии с существующими подходами к проведению капитального ремонта пути была принята 8 ч., а период сгущения поездов при заданных размерах движения составил 3,04 ч. Длительность весенне-летнего периода, в течение которого предоставляются два «окна» в неделю, была принята равной семи месяцам, а осенне-зимнего — пяти месяцам.

Относительный износ изоляции обмотки был определен для трех смоделированных суточных реализаций графика движения поездов, для которых полученные параметры интенсивности движения соответствуют заданным, а искомое значение относительного износа изоляции для указанных периодов работы подстанций было получено как среднее значение по этим трем реализациям. При необходимости число рассмотренных суточных реализаций графика движения поездов может быть увеличено. Оно определяется желаемой точностью получения конечных результатов и их необходимой достоверностью. Значения относительного износа изоляции были найдены для

принятых пяти значений номинального тока первичной обмотки трансформатора, соответствующих мощностям трансформатора 6,3; 10; 16; 25 и 40 МВА и приведенных к напряжению на шинах постоянного тока 3,3 кВ (табл. 2).

Большой диапазон значений относительного износа изоляции обмотки в зависимости от номинального тока первичной обмотки объясняется нелинейной зависимостью между нагрузкой трансформатора и температурой обмотки и резко нелинейной зависимостью между температурой обмотки и интенсивностью старения изоляции [1–3].

На основе результатов, приведенных в табл. 2, построены кривые изменения $\chi_{\text{год}}$ в функции принятых значений номинального тока трансформатора для всех тяговых подстанций участка (см., например, рис. 2). Из приведенного графика следует, что расчетное значение номинального тока трансформатора, соответствующее $\chi_{\text{год}} = 1$, равно 1939 А.

Аналогичные зависимости были построены и для изменения температур наиболее нагретой точки обмотки и верхних слоев масла трансформатора. Оценка расчетных значений номинального тока трансформатора при этом производилась исходя из максимальных допустимых температур обмотки и масла трансформатора, равных соответственно 140 и 95°C. Данные зависимости были построены для периода сгущения поездов после длительных «окон», так как для него указанные температуры наибольшие.

Максимальные температуры наиболее нагретой точки обмотки и верхних слоев масла трансформатора определялись как усредненные по их значениям, полученным для трех смоделированных реализаций графика движения поездов для периода их сгущения после «окна». При более строгом подходе максимальные значения температур обмотки и масла трансформатора при случайном характере нагрузки должны определяться методом последовательного анализа [12]. Такой способ оценки максимальных температур достаточно сложен и сейчас разрабатывается для условий работы тяговых подстанций.

Для получения искомого расчетного значения номинального тока трансформатора необходимо из трех значений расчетного номинального тока, определенных по относительному износу изоляции обмотки, по допустимым максимальным температурам обмотки и масла, выбрать наибольший. Сводные данные для выбора данного значения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Искомые значения расчетного номинального тока трансформатора

Тяговая подстанция	Число работающих трансформаторов	Значение расчетного номинального тока трансформатора, А			Расчетное искомое значение номинального тока трансформатора, А	Стандартное значение номинальной мощности трансформатора, МВА
		по старению изоляции	по температуре обмотки	по температуре масла		
Ср	1	1939	1700	1690	1939	10
	2	970	850	845	970	6,3
Сб	1	3118	3019	2548	3118	16
	2	1559	1510	1274	1559	6,3
Б	1	2029	2548	2289	2548	10
	2	1015	1274	1145	1274	6,3
П	1	1969	2269	2009	2269	10
	2	985	1135	1005	1135	6,3
Х	1	3208	3229	3129	3229	16
	2	1604	1615	1565	1615	6,3

Таблица 4. Результаты расчета температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора для весенне-летнего периода и периода сгущения поездов при выходе из работы одного из трансформаторов

Тяговая подстанция	Максимальное значение температуры, °С	
	Весенне-летний период	Период сгущения поездов
Ср	159	145
Сб	143	170
Б	192	226
П	205	198
Х	159	180

Таблица 5. Результаты расчета температуры верхних слоев масла трансформатора для весенне-летнего периода и периода сгущения поездов при выходе из работы одного из трансформаторов

Тяговая подстанция	Максимальное значение температуры, °С	
	Весенне-летний период	Период сгущения поездов
Ср	83	91
Сб	96	106
Б	118	138
П	102	116
Х	101	109

Как следует из результатов, приведенных в этой таблице, для тяговых подстанций Ср и Сб определяющим показателем оказалось старение изоляции. Для подстанций Б, П, Х определяющим показателем оказалась температура обмотки трансформатора.

На основе расчетного искомого значения определяется стандартная номинальная мощность трансформатора. Если предположить, что на подстанции постоянно в работе находится два трансформатора, то значение расчетного номинального тока трансформатора будет в два раза меньше.

Вопросы резервирования, если предполагается, что в работе постоянно находится один трансформатор, а другой в резерве, решаются и автоматически. В случае выхода из работы одного, второй включается в работу. Если же в работе постоянно находятся два трансформатора, то при аварийном выходе одного из работы необходимо оценить, как воспримет всю нагрузку, которая приходится на подстанцию, один трансформатор, оставшийся в работе.

Для этого были выполнены соответствующие расчеты. Когда один головной трансформатор был выведен из работы, то температуры обмотки и масла оставшегося трансформатора естественно увеличились (табл. 4, 5).

Видно, что в случае работы двух трансформаторов одновременно и выхода одного из работы мощность понижающего (головного) трансформатора на подстанциях Сб, Б, П и Х должна быть увеличена с 6,3 до 10 МВА, так как температура обмотки трансформатора на этих подстанциях превысила допустимую максимальную — 160 °С.

Таким образом, предлагаемый подход к определению трансформаторной мощности тяговых подстанций постоянного тока позволяет учесть действительные условия формирования нагрузки, приходящейся на трансформаторы, без каких-либо допущений и условностей, с непосредственной оценкой физических величин, определяющих тепловое состояние трансформаторов и старение изоляции их обмоток. Ранее предложенные методики определения трансформаторной мощности тяговых подстанций основываются на определенных допущениях, и результаты получаются завышенными. Поэтому неслучайно найденные значения расчетной трансформаторной мощности и выбранные стандартные номинальные мощности трансформаторов для тяговых подстанций оказались меньше по сравнению с

результатами, полученными по существующей методике расчета (см. табл. 1, 3). В тех же двух случаях, когда по предлагаемой и существующей методикам для тяговых подстанций Сб и Х были выбраны трансформаторы одинаковой мощности по 16 МВА (см. табл. 1, 3), расчетные значения номинальной мощности, тем не менее, получились существенно различными. И только ограниченный ряд значений номинальных мощностей в действующей стандартной шкале трансформаторов не позволил реализовать эту существенную разницу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шницер Л. М. Основы теории и нагрузочная способность трансформаторов. — М.: Госэнергоиздат, 1969. — 232 с.
2. ГОСТ 14209-85 (МЭК 354-72). Межгосударственный стандарт. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые перегрузки. — М.: Стандартинформ, 2009. — 36 с.
3. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.
4. Бесков Б. А., Геронимус Б. Е., Давыдов В. Н. и др. Проектирование систем энергоснабжения электрических железных дорог. — М.: Трансжелдориздат, 1963. — 471 с.
5. Давыдов В. Н., Лупшов В. П., Вашурин А. А. Справочник по проектированию, монтажу и эксплуатации устройств энергоснабжения электрической тяги. — М.: Транспорт, 1967. — 312 с.
6. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации (ЦЭ-462). — М., 1997. — 79 с.
7. Справочник по электроснабжению железных дорог / Под ред. Марквардта К. Г. — Т. 1. — М.: Транспорт, 1980. — 256 с.
8. Марквардт К. Г. Исходные положения по созданию математической модели процесса работы устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог // Тр. ин-та / Всесоюз. заоч. ин-т инж. железн. тр-та. — 1969. — Вып. 37. — С. 46-52.
9. Тер-Оганов Э. В. Имитационная модель работы системы электроснабжения двухпутного электрифицированного участка // Тр. ин-та / Всесоюз. заоч. ин-т инж. железн. тр-та. — 1983. — Вып. 117. — С. 58-62.
10. Тер-Оганов Э. В., Посредникова Е. А. Оценка энергетических показателей работы системы электроснабжения двухпутного участка постоянного тока (программный комплекс MODEL) // Алгоритмы и программы. — 1989. — № 10. — С. 16.
11. Максимей И. В. Математическое моделирование больших систем. — Минск: Высш. шк., 1985. — 120 с.
12. Вальд А. Последовательный анализ. — М.: Физматгиз, 1960. — 328 с.