

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 61, № 4 (2018), с. 310–320
310 Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 61, No 4 (2018), pp. 310–320

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-310-320>

УДК 621.311

Влияние перегрузочной способности маслонаполненных трансформаторов на пропускную способность электрической сети

В. А. Анищенко¹⁾, И. В. Гороховик¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В процессе эксплуатации электроэнергетической системы нередко возникает необходимость перегрузки ее отдельных элементов (генераторов, силовых трансформаторов, воздушных и кабельных линий электропередачи, коммутационных электрических аппаратов) продолжительностью от нескольких десятков минут до суток. Причинами перегрузок могут быть преднамеренные отключения параллельных элементов системы для проведения планово-предупредительных ремонтов, послеаварийные отключения, а также непредвиденное увеличение потребляемой электроэнергии вследствие воздействия различных факторов. Перегрузочная способность элементов системы позволяет оперативно повысить эксплуатационную надежность электроснабжения потребителей без дополнительных затрат при сохранении в большинстве случаев практически нормального срока службы электрооборудования. Наибольшей потенциальной перегрузочной способностью обладают силовые маслонаполненные трансформаторы, что дает возможность рассматривать их как значимый источник повышения пропускной способности передающей и распределительной сетей электроэнергетической системы. Чрезмерные перегрузки по току силовых маслонаполненных трансформаторов существенно снижают надежность и сокращают нормальный срок их службы. Это происходит из-за ускоренного процесса износа материала изоляции обмоток трансформаторов в результате перегрева трансформаторного масла, что приводит к структурному изменению и, как следствие, к механическому повреждению изоляции обмоток, что может вызвать электрический пробой. Однако недооценка допустимой перегрузки трансформаторов может привести к экономическому ущербу за счет недовыпуска продукции в случае выхода из работы части параллельно включенных трансформаторов для проведения планово-предупредительных ремонтов или в результате послеаварийных отключений. Возникает необходимость оценки потенциала обоснованного повышения пропускной способности электрической сети и соответственно надежности системы электроснабжения с учетом требований, предъявляемых к допустимым нагрузкам трансформаторов при проектировании электрической сети и работе в различных режимах эксплуатации.

Ключевые слова: силовой маслонаполненный трансформатор, перегрузочная способность, пропускная способность электрической сети

Для цитирования: Анищенко, В. А. Влияние перегрузочной способности маслонаполненных трансформаторов на пропускную способность электрической сети / В. А. Анищенко, И. В. Гороховик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4. С. 310–320. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-310-320>

Адрес для переписки

Анищенко Вадим Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Anishchenko Vadim A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Influence of Oil-Filled Transformers Overload Capacity on the Throughput Capacity of the Electrical Network

V. A. Anishchenko¹⁾, I. V. Gorokhovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. During the operation of the electric power system, there is often a need to overload its individual elements (generators, power transformers, overhead and cable power lines, switching electric devices) for a period lasting from several dozens of minutes to a day. The overloads can be caused by intentional disconnection of parallel elements of the system because of scheduled preventive repairs, post-accident disconnections, as well as an unexpected increase in electricity consumption due to the impact of various factors. The overload capacity of the system elements makes it possible to increase operational reliability of power supply to consumers without additional expenditures while maintaining, in most cases, the almost normal service life of electrical equipment. Oil-filled transformers have the greatest potential overload capacity power, which makes it possible to consider them as a significant source of increasing the capacity of the transmission and distribution networks of the electric power system. Excessive over-current of power oil-filled transformers significantly reduces reliability and reduces their normal service life. This is due to the accelerated process of wear of the insulation material of the transfer windings as a result of overheating of the transformer oil, that causes structural changes and, as a consequence, to mechanical damage to the insulation of the windings; the latter can cause an electrical puncture. On the other hand, underestimation of the permissible overload of transformers might result in economic losses due to under-produced products when the functioning of the part of the transformers connected in parallel are ceased for scheduled preventive maintenance or as a result of forced emergency shutdowns. Therefore, there is a need to assess the potential of reasonable increase in the throughput capacity of the electrical network and, accordingly, the reliability of the power supply system, taking into account the requirements for the permissible loads of transformers when the electrical network and various operating modes are being designed.

Keywords: power oil-filled transformer, overload capacity, electric network capacity

For citation: Anishchenko V. A., Gorokhovich I. V. (2018) Influence of Oil-Filled Transformers Overload Capacity on the Throughput Capacity of the Electrical Network. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (4) 310–320. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-310-320> (in Russian)

Введение

Согласно действующему ГОСТ 14209–97 по определению технически обоснованных режимов нагрузок силовых масляных трансформаторов, представляющему собой полный аутентичный текст МЭК 354 (1991), режимы нагрузок трансформаторов можно классифицировать следующим образом [1]:

– нормальный продолжительный режим, когда график нагрузки достаточно неизменен (равномерен) в течение суток или на более продолжительном интервале времени;

– нормальные режимы систематических нагрузок, представляющие собой циклические не аварийные режимы с нормальным сокращением срока службы трансформаторов; в этих режимах в течение части цикла при достаточно высокой температуре охлаждающей среды ток нагрузки превышает номинальный, однако с точки зрения термического износа изоляции обмоток такие нагрузки эквивалентны номинальной нагрузке при но-

минальной температуре охлаждающей среды, что достигается понижением температуры охлаждающей среды или тока нагрузки в течение остальной части цикла; при работе в таких режимах происходит, как и при постоянных нагрузках, нормальное сокращение срока службы трансформаторов за счет естественного термического износа их изоляции; при планировании нагрузок этот принцип может быть рассмотрен на длительные периоды времени. Следует отметить, что в прежних редакциях стандарта ГОСТ 14209–69 [2] и ГОСТ 14209–85 [3] вместо определения «систематические нагрузки» было использовано определение «допустимые систематические перегрузки», которое подчеркивает, что перегрузки по току на каком-то промежутке времени внутри цикла имеют место, но являются допустимыми, поскольку полностью компенсируются за счет понижения температуры охлаждающей среды или тока нагрузки в течение остальной части цикла. Указанное различие в старой и новой редакциях стандарта носит сугубо терминологический характер и не влияет на суть проблемы;

– режимы продолжительных циклических аварийных перегрузок, которые может выдержать трансформатор без превышения предельного значения температуры наиболее нагретой точки обмотки с большим сокращением срока службы трансформатора по сравнению с нормальным сокращением;

– режимы кратковременных аварийных перегрузок, при которых температура наиболее нагретой точки проводников достигает опасных значений, и может происходить временное снижение электрической прочности изоляции; продолжительность таких перегрузок меньше тепловой постоянной времени трансформатора и составляет менее получаса.

Проектируемый расчетный режим работы трансформаторов

На стадии проектирования систем электроснабжения действующие нормативы рекомендуют выбирать трансформаторы исходя из того, что они могут перегружаться до 5 сут на 40 % при условии, если нагрузка, предшествующая аварийной перегрузке, не превысила 0,93 паспортной мощности трансформатора. При этом продолжительность перегрузки в каждые сутки не должна превышать 6 ч (суммарная длительность подряд или с разрывами), или должны быть задействованы все средства для формирования охлаждения [4, 5].

Номинальную мощность каждого трансформатора главной понизительной двухтрансформаторной подстанции принимают при проектировании равной 0,7 прогнозируемого расчетного максимума нагрузки подстанции. В этом случае при отключении одного трансформатора в результате аварии или для проведения планово-предупредительного ремонта электроснабжение потребителей будет обеспечиваться за счет перегрузки оставшегося в работе трансформатора.

Выбор трансформаторов при проектировании носит ориентировочный характер, поскольку основывается на осредненных характеристиках трансформаторного оборудования и условий его эксплуатации. Этот выбор

не учитывает номинальные мощности трансформаторов, виды их охлаждения, климатические условия местности, где предполагается эксплуатировать трансформаторы. Поэтому принимаемые при проектировании допустимые нагрузки трансформаторов и установленные стандартами их допустимые нагрузки для различных характеристик трансформаторного оборудования и режимов его эксплуатации существенно различаются.

Допустимые величины и длительность нагрузки трансформаторов при эксплуатации

В процессе нагрева изоляция обмоток трансформаторов подвергается термохимическому износу. Этот процесс является кумулятивным и может привести к недопустимому состоянию материала изоляции. Скорость износа изоляции удваивается приблизительно на 6 % при каждом возрастании температуры для трансформаторов, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 11677–85 [6]. Допустимое значение температуры наиболее нагретой точки изоляции обмоток и соприкасающихся с изоляционным материалом металлических частей, гарантирующее естественный нормальный износ изоляции, составляет $\theta_{\text{ннт}} = 98^\circ\text{C}$, что соответствует работе трансформатора с номинальной нагрузкой при температуре охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}} = 0$.

Превышение температуры наиболее нагретой точки изоляции над температурой охлаждающей среды определяется формулой

$$\Delta\theta = \theta_{\text{ннт}} - \theta_{\text{ос}}.$$

Нестационарный процесс изменения превышения температуры достаточно точно описывается выражением [1, 7–9]

$$\Delta\theta_t = \Delta\theta_{\text{н}} + (\Delta\theta_{\text{уст}} - \Delta\theta_{\text{н}}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

где t – текущий момент времени; T – тепловая постоянная времени трансформатора; $\Delta\theta_{\text{н}}$ – начальное превышение температуры; $\Delta\theta_{\text{уст}}$ – установившееся превышение температуры при постоянной нагрузке в течение всего времени нагрева.

Требования, предъявляемые к нагрузкам трансформаторов при их эксплуатации, регламентированы ГОСТ 14209–97 [1]. Они устанавливают технически обоснованные режимы нагрузки силовых масляных трансформаторов с точки зрения допустимых температур и термического износа изоляции, которые учитывают номинальные мощности и виды охлаждения (масляновоздушное или масляноводяное) трансформаторов, температуру охлаждающей среды, кратности перегрузки к предшествующей ей нагрузке.

Кратность допустимой нагрузки (перегрузки) представляет собой отношение текущего тока трансформатора I к его номинальному значению $I_{\text{ном}}$

$$K_2 = \frac{I}{I_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \%$$

На основе требований к допустимым нагрузкам при проектировании [4, 5] и в процессе эксплуатации [1] построены зависимости (рис. 1–4) кратностей допустимых нагрузок (перегрузок) K_2 от температуры охлаждающей среды θ_{oc} для распределительных маслонаполненных трансформаторов мощностью не более 2500 кВ·А, трансформаторов средней мощности до 100 МВ·А и трансформаторов большой мощности – свыше 100 МВ·А, с видами охлаждения ONAN (естественная циркуляция воздуха и масла), ON (естественная циркуляция масла), OF (принудительная циркуляция масла с ненаправленными потоками масла), OD (принудительная циркуляция масла с направленными потоками масла).

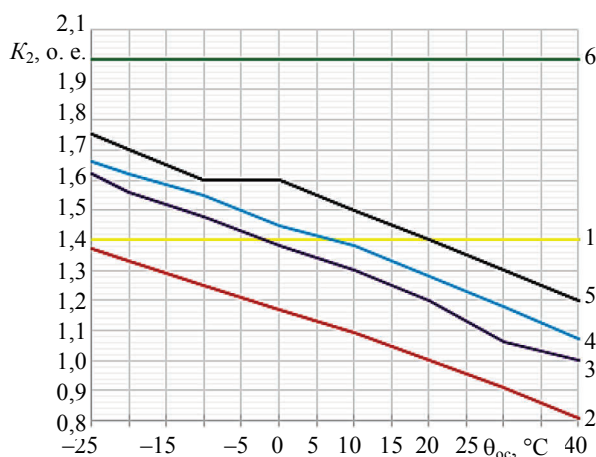


Рис. 1. Допустимые нагрузки распределительных трансформаторов с системой охлаждения ONAN

Fig. 1. Permissible loadings of distribution transformers with the ONAN cooling system

Рассматривали следующие режимы работы трансформаторов:

- 1 – проектируемый расчетный режим нагрузки продолжительностью 6 ч;
- 2 – нормальный продолжительный режим эксплуатации с равномерной в течение суток нагрузкой;
- 3 – нормальный режим эксплуатации с систематическими нагрузками (перегрузками) продолжительностью 6 ч с естественным нормальным сокращением срока службы при кратности предшествующей нагрузке $K_1 = 0,25$;
- 4 – нормальный режим эксплуатации с систематическими нагрузками (перегрузками) продолжительностью 6 ч с естественным нормальным сокращением срока службы при кратности предшествующей нагрузке $K_1 = 0,8$;

5 – режим продолжительных аварийных нагрузок (перегрузок) продолжительностью 6 ч с повышенным сокращением срока службы без учета предшествующей нагрузки;

6 – кратковременный аварийный режим продолжительностью не более 0,5 ч.

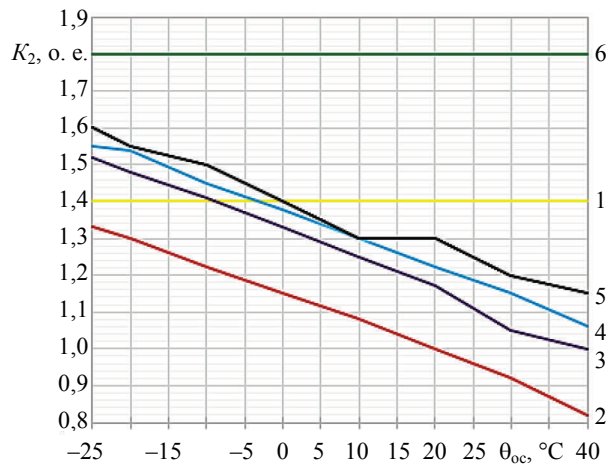


Рис. 2. Допустимые нагрузки трансформаторов средней и большой мощности с системой охлаждения ON

Fig. 2. Permissible loadings of medium and high power transformers with the ON cooling system

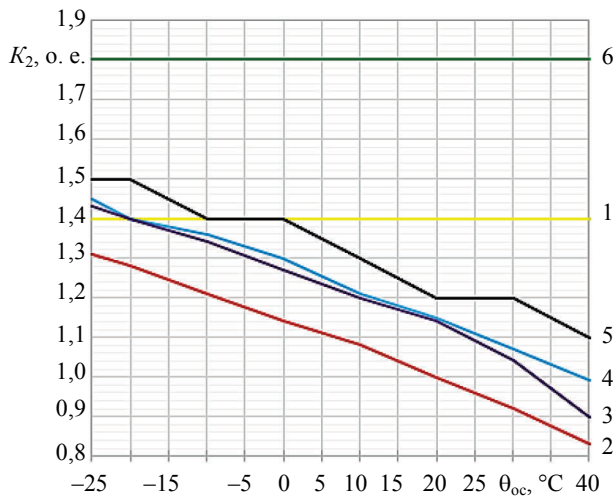


Рис. 3. Допустимые нагрузки трансформаторов средней и большой мощности с системой охлаждения OF

Fig. 3. Permissible loadings of medium and high power transformers with the OF cooling system

Представленные на рис. 1–4 кратности допустимых нагрузок (перегрузок) гарантируют, что предельная недопустимая температура наиболее нагретой точки изоляции с учетом номинальной мощности, вида охлажде-

ния трансформатора не превысит 120–140 °С в режиме нормальных систематических нагрузок, 130–150 °С – в режиме продолжительных аварийных перегрузок и 160 °С – в режиме кратковременных аварийных перегрузок [1].

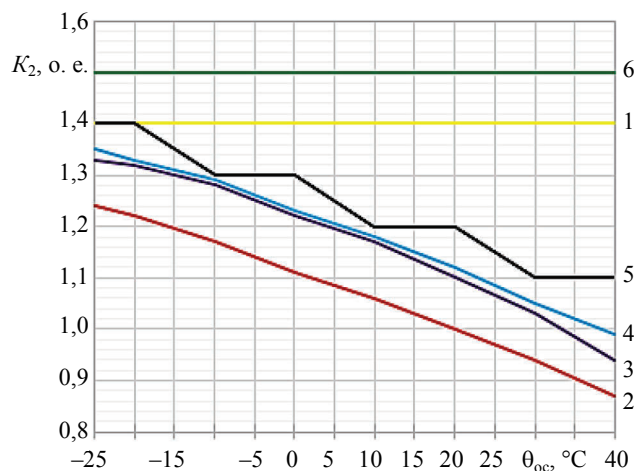


Рис. 4. Допустимые нагрузки трансформаторов средней и большой мощности с системой охлаждения OD

Fig. 4. Permissible loadings of medium and high power transformers with the OD cooling system

Влияние режимов работы трансформаторов на пропускную способность электрической сети

Анализ нагрузок трансформаторов в различных режимах работы позволяет определить потенциал повышения пропускной способности электрической сети путем использования допустимых перегрузок маслонаполненных трансформаторов разных типов в зависимости от температуры охлаждающей среды с учетом кратности предшествующей нагрузки при нормальном режиме работы трансформаторов с систематическими перегрузками.

Потенциал повышения пропускной способности электрической сети Π_i в i -м режиме работы оценивается в процентах по отношению к нормальному продолжительному режиму с равномерной в течение суток нагрузкой ($i = 2$)

$$\Pi_i = \frac{K_{2(i)} - K_{2(2)}}{K_{2(2)}} \cdot 100 \%, \quad i = 1, 3, 4, 5,$$

где $K_{2(i)}$ – кратность допустимой перегрузки трансформатора в i -м режиме работы; $K_{2(2)}$ – то же допустимой нагрузки в нормальном продолжительном режиме.

При определении потенциала повышения пропускной способности электрической сети не рассматривался режим кратковременных аварийных

перегрузок, поскольку он приводит к значительному нарушению нормальной работы трансформатора. В этом режиме рекомендуется по возможности быстрее снизить перегрузку или на короткое время отключить трансформатор [1].

Потенциалы повышения пропускной способности электрических сетей за счет перегрузки распределительных трансформаторов с разными видами охлаждения (ONAN, ON, OF, OD) приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Потенциал повышения пропускной способности электрических сетей (%) за счет перегрузки распределительных трансформаторов с охлаждением ONAN

The potential increase in throughput capacity of electric networks (%) due to overloading of distribution transformers with the ONAN cooling

Допустимый режим работы трансформатора	Температура охлаждающей среды θ_{oc} , °C							
	-25	-20	-10	0	10	20	30	40
Проектируемый	2	5	12	20	28	40	54	73
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,25$	9	13	18	22	25	28	30	33
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,8$	18	17	18	18	19	20	16	23
Аварийный продолжительный эксплуатационный режим с увеличенным сокращением срока службы без превышения предельной температуры наиболее нагретой точки	28	28	28	37	38	40	43	48

Сравнительный анализ данных, приведенных на рис. 1–4 и в табл. 1–4, показывает, что следование принимаемой при проектировании допустимой нагрузке трансформаторов $K_2 = 1,4$ приводит к недооценке реальной пропускной способности сетей с трансформаторами с охлаждением ONAN в диапазоне температур охлаждающей среды от минус 25 до 20 °C по сравнению с рассматриваемыми в стандарте [1] эксплуатационными режимами. Для трансформаторов с охлаждением ON этот диапазон сужается до (-25 °C; 0), а для трансформаторов с охлаждением OF – до (-25 °C; -10 °C). При более высоких температурах проектируемая кратность допустимой перегрузки ведет к переоценке потенциала пропускной способности, особенно при $\theta_{oc} \geq 20$ °C. Для трансформаторов с охлаждением OD такая переоценка имеет место для всего диапазона рассматриваемых температур от минус 25 до 40 °C, что дополнительно сокращает срок службы во всех

эксплуатационных режимах и не гарантирует повышения предельной температуры наиболее нагретой точки проводников трансформаторов [1].

Таблица 2

Потенциал повышения пропускной способности электрических сетей (%) за счет перегрузки трансформаторов средней и большой мощности с охлаждением ON
The potential increase in throughput capacity of electric networks (%) due to overloading of medium and high power transformers with the ON cooling

Допустимый режим работы трансформатора	Температура охлаждающей среды θ_{oc} , °C							
	-25	-20	-10	0	10	20	30	40
Проектируемый	5	8	15	22	30	40	52	71
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,25$	13	14	19	23	24	26	26	30
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,8$	14	14	16	16	16	17	14	22
Аварийный продолжительный эксплуатационный режим с увеличенным сокращением срока службы без превышения предельной температуры наиболее нагретой точки	20	19	23	22	20	30	30	40

Таблица 3

Потенциал повышения пропускной способности электрических сетей (%) за счет перегрузки трансформаторов средней и большой мощности с охлаждением OF
The potential increase in throughput capacity of electric networks (%) due to overloading of medium and high power transformers with the OF cooling

Допустимый режим работы трансформатора	Температура охлаждающей среды θ_{oc} , °C							
	-25	-20	-10	0	10	20	30	40
Проектируемый	7	9	16	23	30	40	52	69
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,25$	10	11	12	13	13	15	16	19
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,8$	9	9	11	11	11	14	13	8
Аварийный продолжительный эксплуатационный режим с увеличенным сокращением срока службы без превышения предельной температуры наиболее нагретой точки	15	17	16	23	20	20	30	33

Таблица 4

Потенциал повышения пропускной способности электрических сетей (%) за счет перегрузки трансформаторов средней и большой мощности с охлаждением OD

The potential increase in throughput capacity of electric networks (%) due to overloading of medium and high power transformers with the OD cooling

Допустимый режим работы трансформатора	Температура охлаждающей среды θ_{oc} , °C							
	-25	-20	-10	0	10	20	30	40
Проектируемый	13	15	20	26	32	40	49	61
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,25$	9	9	9	10	11	12	13	14
Нормальный эксплуатационный с систематическими нагрузками (перегрузками) с нормальным сокращением срока службы при $K_1 = 0,8$	7	8	9	10	10	10	10	8
Аварийный продолжительный эксплуатационный режим с увеличенным сокращением срока службы без превышения предельной температуры наиболее нагретой точки	13	15	11	17	13	20	17	26

Оперативная информация о величинах Π_i позволит дежурному персоналу трансформаторной подстанции количественно оценить повышение пропускной способности электрической сети за счет использования допустимой перегрузки трансформаторов. Практически такая возможность может быть реализована как одна из задач автоматизированной системы контроля и управления трансформаторной подстанции [10].

ВЫВОДЫ

1. Перегрузочная способность силовых маслонаполненных трансформаторов позволяет значительно, до нескольких десятков процентов, увеличить пропускную способность электрической сети и благодаря этому повысить надежность электроснабжения потребителей по сравнению с нормальным продолжительным эксплуатационным режимом с равномерной суточной нагрузкой. При этом увеличение пропускной способности электрической сети при работе в циклических неаварийных режимах достигается при сохранении естественного нормального износа материала изоляции обмоток трансформаторов, а при работе в циклических продолжительных аварийных режимах приводит к небольшому, по сравнению с нормальным, ускорению износа изоляции. В обоих случаях гарантируется соблюдение допустимой температуры наиболее нагретой точки обмоток трансформаторов.

2. Потенциал повышения пропускной способности электрической сети, определяемый исходя из принимаемой при проектировании допустимой перегрузки, может привести при достаточно высокой температуре охлаждающей среды к сокращению срока службы из-за повышения термического износа материала изоляции обмоток трансформаторов. Поэтому выбор номинальных мощностей трансформаторов на стадии проектирования следует производить с учетом климатических условий местности, в которой предполагается их установка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов: ГОСТ 14209–97 (МЭК 354 (1991)).
2. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–69. М.: Изд-во стандартов, 1969. 32 с.
3. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85. М.: Изд-во стандартов, 1985. 30 с.
4. Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», № 5, 1996. 108 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В 2 т. / под общ. ред. А. А. Федорова. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2: Электрооборудование. 592 с.
6. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677–85. М.: Изд-во стандартов, 1990. 58 с.
7. Киш, З. Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / З. Л. Киш. М.: Энергия, 1980. 208 с.
8. Боднар, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. М.: Энергоатомиздат, 1983. 177 с.
9. Пропускная способность трансформаторов как источник повышения пропускной способности электрических сетей / В. А. Анищенко [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Международного семинара имени Ю. Н. Руденко. С. 293–301.
10. Устройство для определения допустимых величин и длительности перегрузки силового маслонаполненного трансформаторного оборудования: пат. 2453859 РФ: МПК: G01R / В. А. Туркот, А. А. Филиппов, Г. М. Цфасман; дата публ. 27.02.2012.

Поступила 09.04.2018 Подписана в печать 19.06.2018 Опубликована онлайн 27.07.2018

REFERENCES

1. State Standard 14209–97 (IEC 354) (1991) *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers* (in Russian).
2. State Standard 14209–69 (1969) *Power Oil Transformers of General Purpose. Permissible Load*. Moscow, Publishing House of Standards. 32 (in Russian).
3. State Standard 14209–85 (1985) *Power Oil Transformers of General Purpose. Permissible Load*. Moscow, Publishing House of Standards. 30 (in Russian).
4. *Guidance and Information Materials on the Design of Electrical Installations*. Moscow, “Tyazhpromelektroproekt” VRDI, 1996. 108 (in Russian).
5. Barsukov A. N., Bodrukhina S. S., Boiko F. K., Budzko I. A., Bushueva O. A., Vershinina S. I., Kudruk M. V., Rykova N. D., Sal'nikov V. G., Semichevskaya N. A., Sidorenko E. T., Sokolova E. M., Tarnizhevskii M. V., Fedorov A. A. (ed.), Shevchenko V. V. (1987) *Guide to Electricity Supply and Electrical Equipment. Vol. 2: Electrical Equipment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 592 (in Russian).
6. State Standard 11677–85 (1990) *Power Transformers. General Specifications*. Moscow, Publishing House of Standards. 58 (in Russian).
7. Kish Z. L. (1980) *Heating and Cooling of Transformers*. Moscow, Energiya Publ., 208 (in Russian).
8. Bodnar V. V. (1983) *Load Capacity of Power Oil Transformers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 177 (in Russian).
9. Anishchenko V. A., Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Kolosova I. V. (2015) Transmitting Capacity of Transformers as a Source of Increase of Capacity of Electric Networks. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue 66. Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar. Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 293–301 (in Russian).
10. Turkot V. A., Filippov A. A., Tsfasman G. M. (2012) *Device for Determination of Permissible Values and Duration of Overload of the Power Oil-Filled Transformer Equipment*. Patent Russian Federation No 2453859 (in Russian).

Received: 9 April 2018

Accepted: 19 June 2018

Published online: 27 July 2018