

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ АВАРИЙНЫХ ПЕРЕГРУЗОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. АДАМЦЕВИЧ В. А.

Белорусский национальный технический университет

Надежность работы электроэнергетических систем в аварийных условиях зависит, в частности, от выбора допустимой длительности кратковременных аварийных перегрузок турбогенераторов и синхронных компенсаторов, которые позволяют поддерживать уровень напряжения в заданном диапазоне при крупных авариях в энергосистеме. Режимы перегрузок возникают в результате отключения части элементов электроснабжения при проведении их плановых или аварийных ремонтов.

Учет перегрузочной способности генераторов и синхронных компенсаторов в условиях эксплуатации позволяет обеспечить надежное электроснабжение потребителей с наименьшими суммарными затратами на поддержание требуемого качества электроэнергии и наименьшим ущербом от недоотпуска электрической энергии.

Нормирование кратковременных аварийных перегрузок генераторов. При эксплуатации синхронных машин существуют нормальные установившиеся режимы, длительно допустимые режимы, отличные от номинальных, а также режимы кратковременных перегрузок синхронных машин в неустановившихся симметричных и несимметричных режимах. В аварийных условиях при перегрузках генераторов и синхронных компенсаторов по токам статора и ротора происходят ускоренный износ изоляции их обмоток и возможна остаточная деформация стержней синхронных машин.

При определении допустимых кратковременных аварийных перегрузок учитываются виды охлаждения электрических машин. Согласно п. 5.1.23 [1] турбогенераторы и синхронные компенсаторы разрешается кратковременно перегружать по токам статора и ротора в соответствии с инструкциями завода-изготовителя, техническими условиями и государственными стандартами. Если же в них необходимые указания отсутствуют, то при авариях в энергосистеме допускается кратковременная перегрузка при указанной в табл. 1 кратности перегрузки по току статора $K_{\pi} = I_{\pi}/I_{\text{ном}}$, где I_{π} – ток перегрузки; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток.

Допустимая перегрузка по току возбуждения турбогенераторов и синхронных компенсаторов с косвенным охлаждением обмоток определяется допустимой перегрузкой статора. Для турбогенераторов с непосредственным водородным или водяным охлаждением обмотки ротора допустимая перегрузка по току возбуждения определяется кратностью тока, отнесенной к номинальному значению тока (табл. 2).

При определении допустимых перегрузок учитывают систему охлаждения машины, ее конструктивные особенности и необходимость сохранения электрических и механических свойств изоляции.

Таблица 1

**Допустимая длительность перегрузки турбогенераторов
и синхронных компенсаторов по току статора**

Кратность перегрузки K_n , о. е.	Продолжительность перегрузки t_n , мин	
	При косвенном воздушном охлаждении обмотки статора	При непосредственном водяном охлаждении обмотки статора
1,1		60
1,15		15
1,2		6
1,25		5
1,3		4
1,4	3	2
1,5	2	1
2,0	1	–

Таблица 2

Допустимая длительность перегрузки турбогенераторов по току ротора

Продолжительность перегрузки t_n , мин, не более	Кратность перегрузки K_n , о. е.	
	ТВФ, кроме ТВФ-120-2	ТГВ, ТВВ (до 500 МВТ включительно), ТВФ-120-2
60	1,06	1,06
4	1,2	1,2
1	1,7	1,5
0,5	2,0	–
0,33	–	2,0

Для генераторов с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора дополнительно учитывается недопустимость вскипания охлаждающей воды или теплового разложения масла при повышенных нагревах, сопровождающих перегрузки. Для роторной обмотки очень важно также не превысить наибольшую разность температур между медью обмотки и сталью бочки ротора, при которой могут возникнуть остаточные деформации стержней и повреждение изоляции обмотки ротора.

Величины этих перегрузок ограничиваются только температурой наиболее нагретой точки изоляции обмоток машины по току статора (ротора). Допустимая длительность перегрузки по току статора турбогенератора (синхронного компенсатора) с косвенным охлаждением при постоянной перегрузке (табл. 1) может быть аппроксимирована следующим образом (рис. 1):

$$t_n = (-0,11K_n^2 + 1,431K_n - 1,421)^{-1}. \quad (1)$$

Перегрузочную характеристику для турбогенераторов ТВГ при постоянной перегрузке по току ротора аппроксимируем зависимостью (рис. 2):

$$t_n = (1,940K_n^2 - 2,734K_n + 0,734)^{-1}. \quad (2)$$

Однако приведенные на рис. 1, 2 кривые не позволяют определить допустимые длительности переменных во времени перегрузок. Кратности перегрузок в ходе развития и ликвидации аварии могут изменяться

в результате работы противоаварийной автоматики, приводящей к перераспределению генерируемых мощностей и изменению нагрузок потребителей.

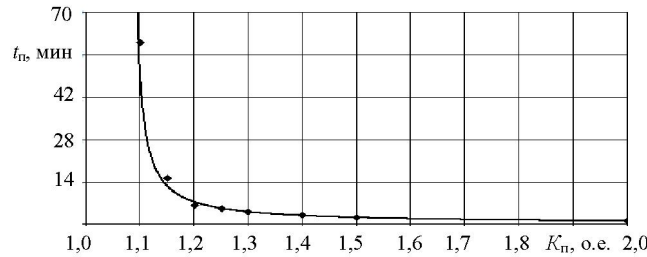


Рис. 1. Перегрузочная способность по току статора генераторов и синхронных компенсаторов

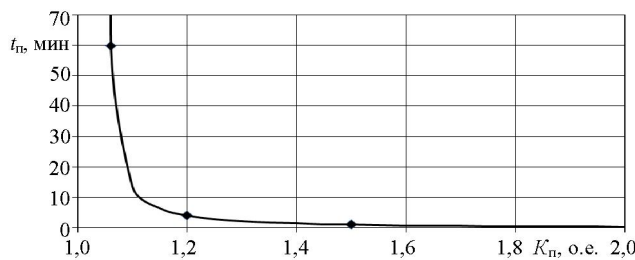


Рис. 2. Перегрузочная способность по току ротора турбогенераторов и синхронных компенсаторов

Неучет изменяющихся во времени кратностей аварийных перегрузок ведет к ошибкам определения их допустимых длительностей и как следствие – к недопустимому перегреву изоляции обмоток статора (ротора) или неполному использованию потенциальной перегрузочной способности генераторов, что влечет за собой недоотпуск электроэнергии.

Для учета переменного характера аварийных кратковременных перегрузок генераторов, как и при определении допустимых переменных аварийных перегрузок силовых трансформаторов [2], следует произвести анализ температурного режима.

Температурный режим генератора при перегрузках. Для любого момента времени при перегрузке турбогенератора по току справедливо уравнение баланса

$$\Delta P dt = A \tau dt + D d\tau, \quad (3)$$

где ΔP – мощность активных потерь при прохождении электрического тока, Вт; A – коэффициент теплоотдачи, Вт/°С; D – теплоемкость генератора, Вт·с/°С; τ – превышение измеренной температуры изоляции обмотки статора (ротора) генератора $\theta_{из}$ над температурой окружающей среды $\theta_{ср}$, °С;

$$\tau = \theta_{из} - \theta_{ср}, \quad (4)$$

$d\tau$ – прирост превышения температуры, °С; dt – шаг времени, с.

Из (3) определяем установившееся значение превышения температуры изоляции обмоток над температурой окружающей среды

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A} = \tau + T \frac{d\tau}{dt}, \quad (5)$$

где $T = D/A$ – постоянная времени нагрева генератора, с.

Уравнению (5) соответствует следующая зависимость превышения температуры обмоток генератора от времени

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_n) \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (6)$$

где τ_n – начальное превышение температуры изоляции обмоток над температурой окружающей среды.

Постоянную времени генератора можно определить из уравнения переходного процесса (6), если известны допустимая длительность перегрузки t_n , допустимое установившееся превышение температуры наиболее нагретой точки изоляции обмотки при номинальной нагрузке генератора $\tau_{доп}^{ном}$, принимаемое за начальное превышение температуры, установившееся превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки при перегрузке $\tau_{уст}^{пер}$ и допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки при перегрузке $\tau_{доп}^{пер}$.

$$T = -t_n \left[\ln \left(\frac{\tau_{уст}^{пер} - \tau_{доп}^{пер}}{\tau_{уст}^{пер} - \tau_{доп}^{ном}} \right) \right]^{-1}. \quad (7)$$

Для того чтобы обеспечить необходимый запас по нагреву, принимают допустимое превышение температуры при перегрузке $\tau_{доп}^{пер}$ меньше установившегося превышения $\tau_{уст}^{пер}$, соответствующего кратности возникшей перегрузки. Последнее представляет собой сумму установившихся превышений температуры изоляции обмотки над температурой охлаждающей поверхности и температуры охлаждающей поверхности над температурой окружающей среды. Исследования теплового режима синхронной машины показали [3], что величина $\tau_{уст}^{пер}$ пропорциональна кратности перегрузки:

$$\tau_{уст}^{пер} = \tau_{доп}^{ном} K_{п}. \quad (8)$$

С ростом температуры при перегрузке значительно увеличивается омическое сопротивление обмоток генератора и соответственно интенсифицируется электротермический процесс, что уменьшает постоянную времени нагрева. Этот фактор следует учитывать при перегрузке более 5 %. Определим зависимость постоянной времени от кратности перегрузки на примере турбогенератора Т-6-2У3 с воздушным охлаждением. Согласно паспортным данным установившаяся температура изоляции обмотки статора этой машины составляет при номинальной нагрузке $\theta_{из}^{ном} = 125$ °С, а при кратковременной перегрузке $\theta_{из}^{пер} = 130$ °С.

Приняв температуру окружающей среды $\theta_{\text{ср}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, определяем из (4) установившиеся превышения температур: $\tau_{\text{уст}}^{\text{ном}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{уст}}^{\text{пер}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Используя соотношение (8), преобразуем формулу (7) и получим зависимость постоянной времени от кратности перегрузки (рис. 3)

$$T = -t_{\text{п}} \left[\ln \left(\frac{K_{\text{п}} - \frac{\tau_{\text{доп}}^{\text{пер}}}{\tau_{\text{доп}}^{\text{ном}}}}{K_{\text{п}} - 1} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

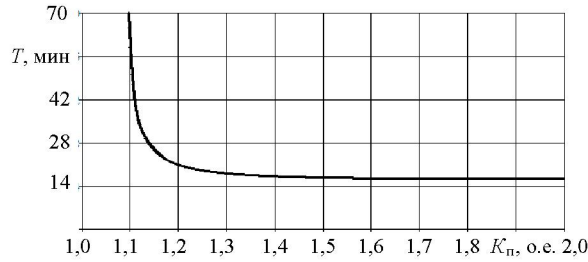


Рис. 3. Постоянная времени турбогенератора Т-6-2У3

Допустимые длительности переменных кратковременных перегрузок генераторов. Приведенные выше нормированные перегрузочные кривые (1), (2) предназначены для определения допустимой длительности постоянных во времени кратковременных аварийных перегрузок ($K_{\text{п}} = \text{const}$). При этом не учитывается предшествующая аварии нагрузка генератора; во всяком случае, предполагается, что она не превышает номинальную. Основанием этому служит то обстоятельство, что аварии происходят редко и вероятностью перегрузки генератора непосредственно перед появлением рассматриваемой аварии можно пренебречь.

Если кратность перегрузки $K_{\text{п}}$ в ходе аварии существенно изменяется, определение допустимой длительности перегрузки исходя из нормировочных кривых (1), (2) приводит к недопустимо большим погрешностям, так как в этот момент изменяются начальное превышение и соответствующее ей ожидаемое установившееся превышение температуры изоляции над температурой окружающей среды, а также постоянная времени нагрева T .

Возможны два способа определения допустимой длительности переменной перегрузки. Первый предполагает использование переходной функции теплового процесса (6). Для этого необходимо измерять текущие температуры изоляции обмотки $\theta_{\text{из}}$ и охлаждающей среды $\theta_{\text{ср}}$, рассчитывать соответствующие превышения температуры изоляции, а также ожидаемые установившиеся превышения температуры в зависимости от кратности перегрузки согласно (8). Одновременно необходимо корректировать постоянную времени по (9).

Допустимая длительность перегрузки в каждый момент времени t определяет по формуле

$$t_{\text{п}} = -T \ln \left(\frac{\tau_{\text{уст}}^{\text{пер}}(t) - \tau_{\text{доп}}^{\text{пер}}(t)}{\tau_{\text{уст}}^{\text{пер}}(t) - \tau(t)} \right), \quad (10)$$

где $\tau(t)$ – текущее превышение температуры изоляции над температурой окружающей среды.

Недостаток такого подхода к определению допустимой длительности переменной перегрузки заключается в том, что измерения температур в различных элементах конструкций электрических машин связаны с большими техническими трудностями и производятся со значительными погрешностями даже в исследовательских лабораториях и в готовых машинах на испытательных станциях [4]. Это обуславливается несколькими факторами. В первую очередь, трудно добиться, чтобы датчик температуры сам приобретал ту температуру, которая подлежит измерению в каждый момент времени. Особенно наглядно это проявляется при измерении температуры поверхности.

Практически невозможно добиться, чтобы температура ртутного (стержневого) термометра полностью сравнялась с температурой поверхности, поскольку зона охлаждения намного меньше площади поверхности. Точность измерения в значительной мере зависит и от давления, с которым шарик термометра прижимается к поверхности. В принципе, введение датчика температуры в исследуемое место, как правило, нарушает температурное поле.

В условиях эксплуатации электрических машин на производстве точность измерения температур еще ниже, чем при испытаниях. Дополнительно следует также учесть, что при кратковременных перегрузках с быстро меняющейся кратностью возрастает динамическая погрешность, обусловленная тепловой инерционностью самого датчика температуры.

Второй способ определения допустимой длительности переменной нагрузки основан на использовании информации только о перегрузках генераторов, которые рассчитываются по показаниям амперметров, намного более точных по сравнению с показаниями датчиков температур. Связь между отношением превышений температур $K_\tau = \tau_{уст}^{пер} / \tau_{доп}^{ном}$ и кратностью перегрузки $K_n = I_n / I_{ном}$ достаточно точно описывается инерционным звеном первого порядка

$$W(P) = \frac{K_\tau}{K_n} = \frac{1}{TP + 1}, \quad (11)$$

где T – постоянная времени; $P = d/dt$ – оператор Лапласа.

Допустимая длительность перегрузки, определяемая в текущий момент времени t :

$$t_n(t) = -T \ln \left(\frac{K_n(t) - K_{n,доп}}{K_n(t) - \overline{K_n}(t)} \right), \quad (12)$$

где $K_n(t)$ – кратность перегрузки в текущий момент времени t ; $K_{n,доп}$ – допустимая кратность перегрузки, соответствующая допустимому превышению температуры изоляции обмоток $\tau_{доп}^{пер}$; $\overline{K_n}(t)$ – осредненная текущая кратность перегрузки, соответствующая текущему превышению температуры изоляции обмоток.

Осреднение перегрузки удобно производить методом экспоненциального сглаживания [5]

$$\overline{K}_n(t) = \alpha K_n(t) + (1 - \alpha) \overline{K}_n(t - h), \quad (13)$$

где $\overline{K}_n(t)$ – осредненная кратность перегрузки в момент времени t ; $\overline{K}_n(t - h)$ – то же в предыдущий момент времени $(t - h)$; h – интервал временной дискретизации процесса; α – параметр сглаживания, определяемый при $T \gg h$ по формуле:

$$\alpha = 1 - \exp(-h/T). \quad (14)$$

Используя рекуррентную формулу (13), можно непрерывно отслеживать осредненную кратность перегрузки и таким способом косвенно контролировать температурный режим генератора. Фактическая кратность перегрузки $K_n(t)$ эквивалентна соответствующему ей ожидаемому установившемуся превышению температуры $\tau_{уст}^{пер}$, которое в процессе перегрузки может непрерывно изменяться. Осредненная кратность перегрузки $\overline{K}_n(t)$ эквивалентна начальному превышению температуры τ в начале каждого интервала дискретизации.

В табл. 3 приведены нормированные допустимые длительности постоянных перегрузок, взятые из табл. 1, и их значения, рассчитанные для турбогенератора Т-6-2У3 по (12) с учетом зависимости его постоянной времени от перегрузки (9) при допустимой кратности перегрузки $K_{n,доп} = 1,059$, равной отношению превышений температур K_τ .

Таблица 3

Допустимые длительности постоянных перегрузок статора t_n , мин

Способ определения	Кратность перегрузки, K_n , о. е.							
	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,40	1,50	2,00
Регламентированные согласно табл. 1	60	15	6	5	4	3	2	1
Согласно (11) и (9)	60,3	15,1	6,02	5,02	4,01	3,01	2,01	1,00

Высокая степень совпадения приведенных в табл. 3 значений t_n подтверждает корректность формулы (12).

На рис. 4 представлены рассчитанные по формуле (12) зависимости допустимой длительности перегрузок статора турбогенератора Т-6-2У3 от их фактической и осредненной кратностей.

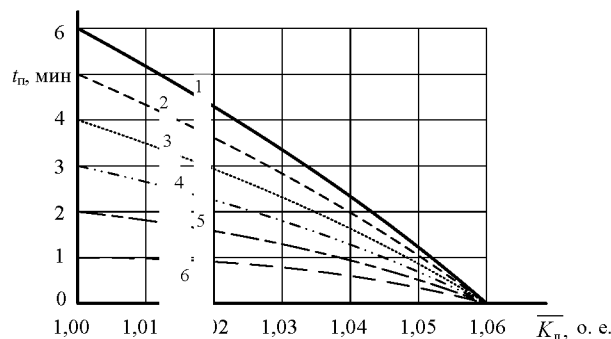


Рис. 4. Допустимые длительности перегрузок статора турбогенератора Т-6-2У3: 1 – $K_n(t) = 1,2$; 2 – $1,25$; 3 – $1,3$; 4 – $1,4$; 5 – $1,5$; 6 – $2,0$

Запас допустимой длительности в момент времени t постоянной перегрузки, возникшей в начальный момент $t = 0$, определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{зап}}(t) = t_n(0) - t. \quad (15)$$

Запас допустимой длительности переменной перегрузки в момент времени t равен допустимой длительности перегрузки, определяемой согласно (12) в тот же момент времени:

$$\Delta t_{\text{зап}}(t) = t_n(t). \quad (16)$$

Проиллюстрируем эффективность учета переменного характера перегрузки статора на примере турбогенератора Т-6-2У3. На рис. 5 показаны заданные изменяющаяся во времени фактическая (кривая 1) и соответствующая ей осредненная (кривая 2) кратности перегрузки.

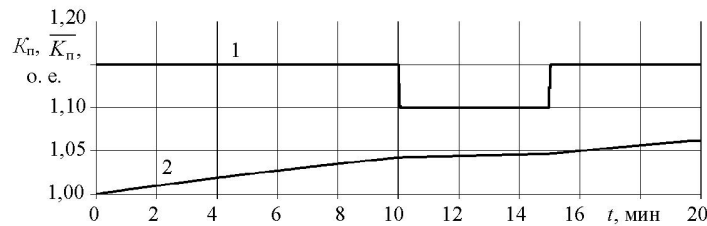


Рис. 5. Фактическая и осредненная перегрузки статора

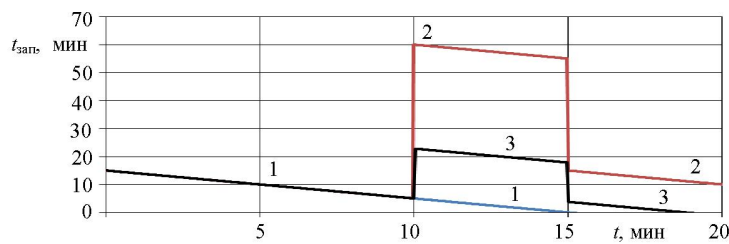


Рис. 6. Запасы допустимых длительностей перегрузок статора

Кривая 1 на рис. 6 показывает изменение во времени запаса допустимой длительности постоянной перегрузки кратностью $K_n = 1,2$, рассчитанной по (15) на основе нормированной перегрузочной кривой (1). Кривая 2 на рис. 6 показывает изменение рассчитанной по той же формуле допустимой длительности изменяющейся перегрузки, но без учета предыстории развития аварийного процесса. Кривая 3 на этом же рисунке, определенная по формуле (12) с учетом (15), показывает допустимую длительность перегрузки с учетом ее переменного характера и предыстории развития аварии.

Аналогичным образом определяется допустимая длительность кратковременной аварийной перегрузки турбогенераторов и синхронных компенсаторов по току ротора. На рис. 7 представлены фактическая (кривая 1) и осредненная (кривая 2) перегрузки ротора турбогенератора Т-6-2У3, на рис. 8 — запасы допустимых длительностей перегрузок в зависимости от выбранной методики определения. Кривая 1 определена по (15), кривая 2 — по той же формуле, но без учета предыстории развития аварии. Кривая 3, определенная по (12) с учетом (15), показывает допустимую длительность перегрузки ротора Т-6-2У3 с учетом предыстории и изменяющегося во времени характера развития аварии.

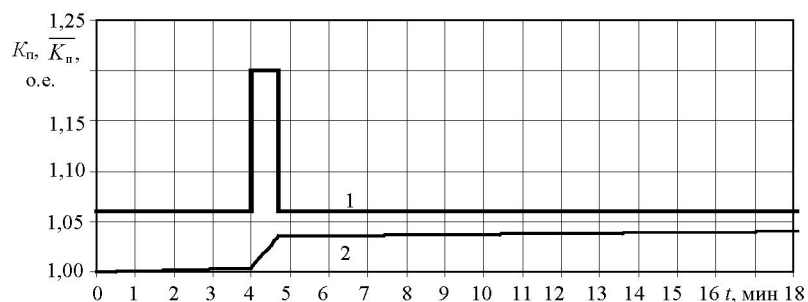


Рис. 7. Фактическая и осредненная перегрузки ротора

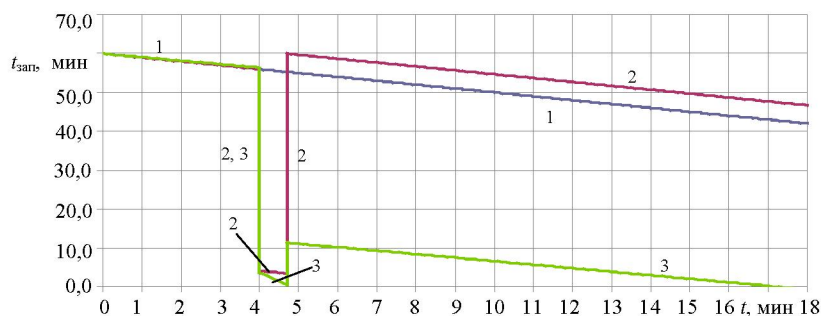


Рис. 8. Запасы допустимых длительностей перегрузок ротора

ВЫВОДЫ

1. Показано, что неучет возможных изменений кратности кратковременной аварийной перегрузки турбогенераторов и синхронных компенсаторов в процессе развития аварии может привести к недопустимо большим ошибкам при определении допустимой длительности перегрузки исходя из перегрузочной кривой, нормированной для постоянных во времени перегрузок.

2. Разработан способ определения допустимой длительности кратковременной перегрузки турбогенератора (синхронного двигателя), учитывающий изменение кратности перегрузки в процессе аварии.

3. Учет переменной кратности перегрузки в процессе аварии позволит избежать повреждения изоляции обмоток статора (ротора) и в полном объеме использовать перегрузочную способность турбогенератора, что снизит возможный из-за преждевременного отключения турбогенератора недоотпуск электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а в и л а технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004. – 336 с.
2. А н и щ е н к о, В. А. Контроль допустимых кратковременных аварийных перегрузок силовых трансформаторов / В. А. Анищенко, В. А. Адамцевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 4. – С. 23–33.
3. П р о е к т и р о в а н и е электрических машин / И. П. Копылов [и др.]. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
4. Б о д н а р, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.
5. Б е н д а т, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 404 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 23.03.2011