

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НАГРЕВА ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Осипов Д. С.¹, Планков А. А.¹, Бугреева А. Е.², Долгих Н. Н.¹, Еремин Е. Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, просп. Мира, д.11), e-mail: plankov_al@mail.ru

²Омский филиал ОАО «Территориальная генерирующая компания № 11», Омск, Россия (644037, Омск, ул. Партизанская, 10)

В статье рассматриваются несинусоидальность в электроэнергетических системах с учетом дополнительного нагрева токоведущих частей и возможные последствия неучета нагрева токоведущих частей. Описаны тепловые процессы в трансформаторах и кабелях. Исследовано влияние фактической температуры токоведущих частей на расчет несинусоидального режима и расчет потерь мощности. Показано, что температурная зависимость может повлиять на распространение высших гармоник, генерируемых другими источниками. Также показано, что при расчете потерь и выборе мероприятий по снижению потерь неучет нагрева может привести к серьезным ошибкам. Доказано, что учет нагрева дает возможность уточнить расчетное снижение потерь более чем на 40 %. Сделан вывод о целесообразности учета нагрева токоведущих частей при выборе мероприятий по снижению потерь и улучшению показателей качества электроэнергии в сетях промышленного типа.

Ключевые слова: нагрев токоведущих частей, потери мощности, высшие гармоники, электроэнергия, показатели качества.

SIMULATION OF NON-SINUSOIDAL MODE OF ELECTRIC POWER SYSTEMS GIVEN THE HEAT OF CURRENT-CARRYING PARTS

Osipov D. S.¹, Plankov A. A.¹, Bugreeva A. E.², Dolgikh N. N.¹, Eremin E. N.¹

¹Omsk State Technical University (644050, Omsk, prospect Mira, 11)

²Omsk Branch of Open joint-stock company «Territorial Generation company № 11» (644050, Omsk, street Partizanskaya, 10)

In article are considered a non-sinusoidal in electrical power systems taking into accounting of an additional heating of the current-carrying parts and the possible consequences of not accounting of heating of current-carrying parts. Thermal processes in transformers and cables are described. The influence of the actual temperature of the current-carrying parts on calculation of the non-sinusoidal mode and calculation of power losses is investigated. It is shown that the temperature dependence can influence the distribution of the higher harmonics generated by other sources. It is also shown that at calculation of losses and a choice of measures to reduce the losses not accounting of heating can bring to serious errors. It is proved that the accounting of heating makes it possible to refine the estimated reduction in losses more than 40%. The conclusion is drawn on expediency of the accounting of heating of current carrying parts at a choice of actions for decrease in losses and to improvement of indicators of quality of the electric power in networks of industrial type.

Keywords: heating of current-carrying parts, power loss, higher harmonics, power, quality indicators.

Введение

Проблема обеспечения качества электроэнергии является важнейшей проблемой, определяющей надежность и эффективность электроснабжения потребителей [1]. Одним из отрицательных действий некачественной электроэнергии для энергосистем является повышение температуры проводов линий электропередачи, а также обмоток трансформаторов и вращающихся электрических машин выше, которая может превысить допустимый уровень. Сопротивление элементов сети за счет колебания температуры может изменяться примерно на 40 %, а значит, на столько же могут изменяться и потери мощности. Следовательно, при расчете

потерь электрической энергии необходимо учитывать температуру нагрева токоведущих частей.

В настоящее время существуют методы учета фактического нагрева токоведущих частей при выборе электрических аппаратов, а также расчета и оптимизации потерь. Однако ни одна из существующих методик не учитывает наличие в сети токов с несинусоидальной кривой, т.е. наличие несинусоидальных режимов. Такие режимы в большинстве случаев являются неэкономичными и могут быть технически недопустимыми. Для решения задач оценки экономичности и допустимости этих режимов, а также для выбора мероприятий по снижению уровня несинусоидальности требуется более точное моделирование элементов сети, нагрузок и источников питания.

Анализ литературы показал, что при расчете потерь мощности фактор нагрева токоведущих частей учитывается редко и только для проводов [2, 3, 4]. Интерес представляет работа по особенностям расчета несинусоидальных режимов электрических сетей методом узловых потенциалов [5]. С помощью этого метода можно рассчитать уровни высших гармоник практически во всех электрических сетях.

Температурная зависимость сопротивления сама не генерирует высшие гармоники, но она может в значительной степени повлиять на распространение гармоник, генерируемых другими источниками. Это влияние будет тем существеннее, чем больше рабочий диапазон температур проводника и соответственно диапазон изменения активного сопротивления.

Для моделирования стационарного или несинусоидального режимов электрических сетей с учетом температурной зависимости сопротивлений элементов этих сетей от параметров режима (нагрева токоведущих частей) необходимы выражения, связывающие электрические и тепловые величины. Эта связь описывается уравнениями теплового баланса.

Рассмотрим эти уравнения применительно к каждому из следующих объектов: масляный трансформатор; сухой трансформатор; кабель, проложенный в земле, и кабель, проложенный в воздухе.

Тепловые процессы в трансформаторах

При работе трансформатора часть электромагнитной энергии превращается в тепло, рассеиваемое в окружающую среду. Главным источником тепла являются сердечник и обмотки, потери в которых составляют примерно 80 % всех потерь.

Теплопередача в трансформаторе осуществляется всеми возможными способами, а именно: путем теплопроводности, излучения и конвекции [6].

Тепловые процессы в кабелях

Для теплового расчета необходимо в общем случае:

1. Составить принципиальную схему замещения тепловых сопротивлений и тепловых потоков, вид которой зависит от конструкции и способа прокладки кабеля.

2. Определить потери в жиле $R_{ж}$, оболочках $R_{об}$ и изоляции (диэлектрические потери) R_d кабеля.

3. Определить тепловые сопротивления:

- изоляции кабеля и его защитных покровов;
- среды, окружающей кабель.

Выражения, описывающие функциональную зависимость температуры проводников от параметров режима электрической сети для разных ее элементов, как было показано в [7], имеют разный вид, который определяется уравнениями теплового баланса. В простейшем случае при симметричной токовой нагрузке в стационарном тепловом режиме уравнение теплового баланса с учетом теплового действия высших гармоник тока имеет следующий вид:

$$3(1 + \alpha t_n) \sum_v I_v^2 R_{v,0} = A(t_n - t_{окр}), \quad (1)$$

где I_v – действующее значение тока v -й гармоники, А;

$R_{v,0}$ – активное сопротивление току v -й гармоники при 0 °С, Ом;

A – коэффициент теплоотдачи.

Учитывая тепловое действие высших гармоник тока [7], получим выражения для определения перепада температуры между токоведущими частями и окружающей средой:

1. Для сухого трансформатора

$$\Theta_m = \left(\frac{1}{A_m} \cdot 3(1 + \alpha(\Theta_m + t_{окр.m})) \sum_v I_v^2 R_{mv,0} \right)^{0,8}; \quad (2)$$

2. Для масляного трансформатора

$$\Theta_m = \Theta_m + \Theta_{об} = \left(\frac{1}{A_{об}} \cdot 3(1 + \alpha(\Theta_m + t_{окр.m})) \sum_v I_v^2 R_{mv,0} \right)^{0,8} + \left(\frac{1}{A_{об}} \left(P_{хв} + 3(1 + \alpha(\Theta_m + t_{окр.m})) \sum_v I_v^2 R_{mv,0} \right) \right)^{0,8}; \quad (3)$$

3. Для кабеля, проложенного в земле

$$\Theta_{жк} = \frac{1}{A_k} \cdot 3(1 + \alpha(\Theta_{жк} + t_{окр.к})) \sum_v I_v^2 R_{kv,0}; \quad (4)$$

4. Для кабеля, проложенного в воздухе

$$\Theta_{жк} = 3(1 + \alpha(\Theta_{жк} + t_{окр.к})) \sum_v I_v^2 R_{kv,0} (S_k + A_k \Theta_n^{-0,25}), \quad (5)$$

$$\text{где } \Theta_n = \left(A_k 3(1 + \alpha(\Theta_{жк} + t_{окр.к})) \sum_v I_v^2 R_{kv,0} \right)^{0,8}; \quad (6)$$

5. Для провода ВЛЭП

$$\Theta_{np} = \frac{1}{KF} 3(1 + \alpha(\Theta_{np} + t_{окр})) \sum_v I_v^2 R_{nv,0} \quad (7)$$

Из выражений (2–7) следует, что задача расчета температуры нагрева проводников с учетом температурной зависимости является нелинейной. Один из способов решения таких задач – применение численных методов. На современном этапе развития вычислительной техники и программного обеспечения этот способ представляется наиболее оптимальным с точки зрения реализации и получения результатов.

С целью определения влияния фактической температуры токоведущих частей на расчет несинусоидального режима и расчет потерь мощности были проведены соответствующие исследования.

В ходе проводимых исследований ставилась задача оценить степень влияния учета температуры токоведущих частей и высших гармоник на потери активной мощности. Параметры расчетной схемы электроснабжения (рисунок 1) приведены в таблицах 1 и 2.

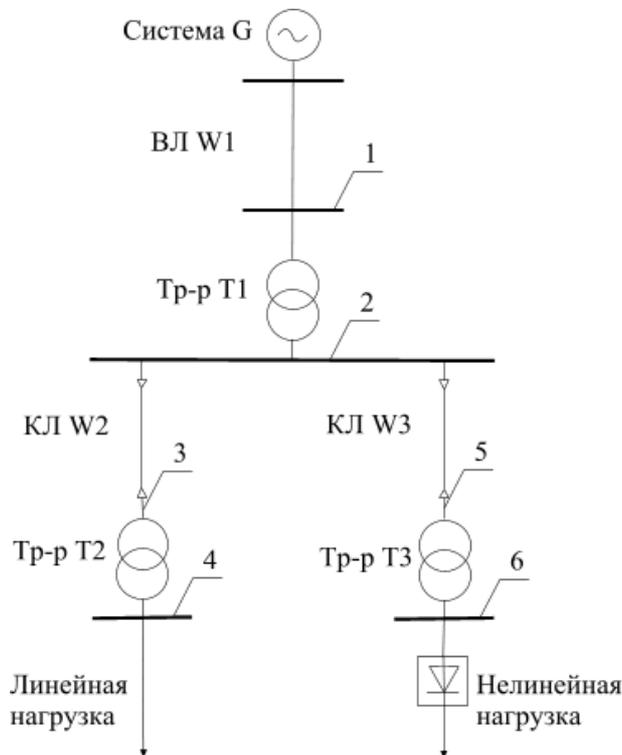


Рисунок 1. Расчетная схема электроснабжения

Таблица 1. Параметры линий

Тип и номинальное напряжение	№ линии	Марка	Сечение F, мм ²	Допустимый ток I _{доп} , А	Допустимая температура t _{доп} , °С	Длина L, км	Окружающая среда
ВЛЭП 110 кВ	W1	АС	120	390	+70	10	Воздух
КЛЭП 10 кВ	W2 W3	АПсшБбШв	35	136	+90	5	Воздух

Таблица 2. Параметры трансформаторов

№ трансформатора	Номинальная мощность $S_{ном}$, кВА	Номинальное напряжение $U_{вн}/U_{нн}$, кВ	Допустимая температура $t_{доп}$, °С	Тип
T1	6300	115/11	+85	Масляный
T2,T3	2500	11/0,69	+85	Масляный

Следует отметить, что неучет фактического нагрева токоведущих частей может приводить к значительным погрешностям при расчете потерь мощности и энергии. Для трансформатора T3 был проведен вычислительный эксперимент по определению погрешности расчета потерь мощности при учете и неучете температуры (рисунок 2, таблица 3):

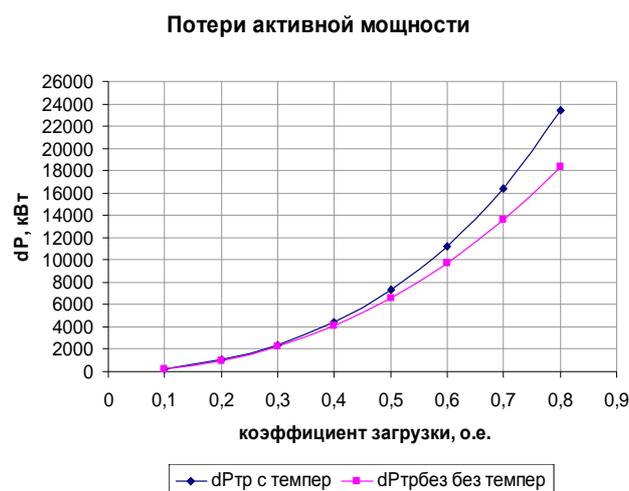


Рисунок 2. Расчет потерь мощности в КЛЭП при учете и неучете температуры

Таблица 3. Расчет погрешности определения потерь мощности

Коэффициент загрузки, о.е.	Потери мощности при учете температуры, ΔP^t , Вт	Потери мощности при неучете температуры, ΔP , Вт	Погрешность определения потерь мощности, ΔP , %
0,1	250,5	240,1	4,2
0,2	1031,3	978,97	5,1
0,3	2405,1	2249,4	6,5
0,4	4465,9	4092,1	8,4
0,5	7347,8	6556,1	10,8
0,6	11246,4	9702,9	13,7
0,7	16447,3	13605,1	17,3
0,8	23407,3	18360	21,6

На основании приведенных данных можно сделать следующий вывод: при увеличении коэффициента загрузки погрешность начинает превышать допустимый предел точности 5%. А для данного случая при коэффициенте загрузки трансформатора 0,8 погрешность достигает 21,6 %, что довольно значительно.

Аналогичные зависимости были получены при отличных от указанных выше условий проведения эксперимента, а именно, при прокладке КЛЭП в земле, воздушном типе охла-

ждения трансформаторов Т2,Т3 и различной температуре окружающей среды в диапазоне от -25 до +30 °С.

Анализ этих зависимостей показал, что способ прокладки КЛЭП и температура окружающей среды незначительно влияют на характер зависимостей $\delta P=f(k_{загр})$. С возрастанием протяженности КЛЭП и понижением температуры окружающей среды согласно приведенным графикам погрешность расчета возрастает. Таким образом, условия, при которых целесообразно учитывать нагрев токоведущих частей при расчете потерь активной мощности в данной сети, определяются главным образом загрузкой элементов электроэнергетической системы. Вместе с тем длина КЛЭП оказывает существенное влияние на точность расчета. Так, при полной загрузке элементов рассматриваемой расчетной схемы погрешность при длине КЛЭП, равной 0,5 км, составляет 20 %, а при длине 5 км – 35 %. Это означает, что чем более протяженными являются распределительные сети, тем более важным становится учет фактического нагрева токоведущих частей при расчете потерь мощности.

В таблице 4 представлены результаты вычислительного эксперимента, полученные с помощью разработанной программы и содержащие данные численных значений напряжений и токов основной частоты и высших гармоник, а также потери мощности в элементах СЭС.

Таблица 4. Результаты вычислительного эксперимента

Параметр	Элемент электрической сети					
	Трансформатор			ЛЭП		
	T1	T2	T3	W1	W2	W3
Температура токоведущих частей, °С	70,86	83	84,97	16	65,67	67,15
Ток основной гармоники, А	32,25	165,56	157,35	30,94	166,01	157,79
Потери активной мощности с учетом высших гармоник, Вт	52321	39797	41796	2438	332552	345557
Потери активной мощности от тока промышленной частоты, Вт	51033	39744	36203	2248	332392	302498
Ток 5-й гармоники, А	2,388	3,85	29,00	199,20	2,39	27,46
Ток 7-й гармоники, А	1,58	1,13	19,89	132,38	0,35	19,08
Ток 11-й гармоники, А	1,04	0,14	12,36	87,54	0,14	12,22
Ток 13-й гармоники, А	0,94	0,024	10,40	78,72	0,04	10,51

Как было показано выше, неучет температуры окружающей среды может также внести определенного рода погрешность в расчет сопротивления. Для оценки этой погрешности был произведен вычислительный эксперимент при изменении температуры окружающей среды от -30 до +20 °С. Были получены следующие (таблица 5, рисунок 3) результаты для элементов W3 и T3.

Таблица 5. Расчет потерь при различных температурах окружающей среды

Температура окружающей среды t , °C	Потери активной мощности в трансформаторе ТЗ, Вт	Потери активной мощности в линии W3, Вт
-30	19 160	33 559
-25	19 607	34 388
-15	20 054	35 218
-10	20 503	36 050
-5	20 952	36 883
0	21 402	37 718
5	21 853	38 555
10	22 304	39 393
15	22 756	40 233
20	23 209	41 075

Следует отметить, что диапазон изменения расчета потерь мощности может достигать 20–25 % для кабельной линии и 5–10 % – для трансформатора. На основании этого можно сделать вывод, что учет окружающей температуры для кабельных линий, проложенных в воздухе, и в случае значительных перепадов между зимними и летними температурами обязателен.

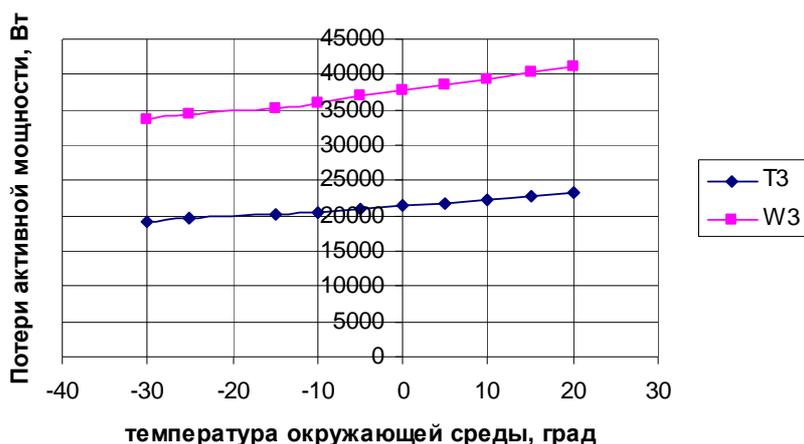


Рисунок 3. Расчет потерь мощности при различных температурах окружающей среды

Выводы

1. Температурная зависимость сама не генерирует высших гармоник, но в значительной степени может повлиять на распространение гармоник, генерируемых другими источниками.
2. Неучет нагрева при выборе мероприятий по снижению потерь может привести к более серьезным ошибкам, чем просто при расчете потерь.
3. Учет нагрева дает возможность уточнить расчетное снижение потерь более чем на 40 %.

Полученные показатели позволяют сделать вывод о целесообразности учета нагрева токоведущих частей при выборе мероприятий по снижению потерь и улучшению показателей качества электроэнергии в сетях промышленного типа.

**Статья опубликована при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения соглашения № 14.В37.21.0332 от 27 июля 2012 г.*

Список литературы

1. Горюнов, В. Н. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов, С. Ю. Долингер, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 168–173.
2. Пospelов Г. Е., Сыч Н. М. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Под ред. Г. Е. Пospelова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 216 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. Т. 2. Электрооборудование / Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.
4. Горюнов, В. Н. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник / В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов, А. Г. Лютаревич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 268–273.
5. Виноградов А. А., Володин В. В., Рысев А. М.. Особенности расчета несинусоидальных режимов электрических сетей методом узловых напряжений // IV Всесоюзн. сов. по качеству электрической энергии. Винница: Тез. докл. – Киев: ФОЛ Института электродинамики АН УССР, 1978. – Ч. 3. – С. 106-108.
6. Гиршин С. С. Расчет потерь в обмотках силовых масляных трансформаторах с учетом нагрева. Омск, 2001. Деп. в ВИНТИ 5.07.01, №1610 – В2001.
7. Осипов, Д. С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем: дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Осипов. – Омск: ОмГТУ, 2005. – 152 с.

Рецензенты:

Сидоров О. А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Электроснабжение железнодорожного транспорта" ФГБОУ ВПО "Омский государственный университет путей сообщения", г. Омск.

Федоров В. К., д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электрификации сельского хозяйства ФГБОУ ВПО "Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина", г. Омск.