

УДК 621.311.019.3

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА
ТОКА ИСТОЧНИКА ОТБОРА МОЩНОСТИ**А.Е. Глазырина¹, Д.С. Левин², С.А. Петренко³¹ Санкт-Петербургский политехнический университет² Филиал ОАО «Волжская ТГК» «СарГРЭС», г. Саратов³ Камышинский технологический университет (филиал)
ВолГТУ, г. Камышин

E-mail: alexandra.spbstu@gmail.com

Глазырина Александра Евгеньевна, бакалавр кафедры «Экстремальные процессы в материалах и взрывобезопасность» факультета военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета.

E-mail:

alexandra.spbstu@gmail.com

Область научных интересов: моделирование электромагнитных устройств, информационно-измерительные комплексы.

Левин Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, начальник смены электрического цеха филиала ОАО «Волжская ТГК» «СарГРЭС», г. Саратов.

E-mail: levinsgtu@mail.ru

Область научных интересов: мониторинг гололеда воздушных линий электропередачи, системы дистанционных измерений.

Петренко Станислав Александрович, ведущий инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического университета (филиала) Волгоградского государственного технического университета, г. Камышин.

E-mail: kitaec2727@gmail.com

Область научных интересов: разработка электронных устройств с микропроцессорным управлением и высокоточных устройств со сложной топологией работы на пассивных компонентах.

В статье рассматриваются вопросы создания математической модели трансформатора тока, используемого для питания периферийных постов телеметрии гололедной нагрузки на провода воздушных линий электропередачи. Описываемая математическая модель качественно и количественно отображает особенности выходных параметров трансформатора тока и позволяет оценить его рабочие характеристики в зависимости от геометрических размеров, материала магнитопровода, количества витков и сопротивления, используемого трансформатора тока. Математическая модель построена с использованием метода конечных элементов, позволяющего рассчитать требуемые параметры трансформатора тока с максимальными выходными характеристиками. По результатам моделирования определены требуемые закономерности изменения выходных параметров трансформатора тока, используемого для питания автоматики постов телеметрии гололеда, в зависимости от величины внешней нагрузки. Также определены критерии оптимизации конструкции трансформатора тока. Произведено сравнение экспериментальных результатов с результатами расчета математической модели на предмет соответствия математической модели реальной. Результаты моделирования планируется использовать в рамках комплексной работы над созданием системы питания постов телеметрии гололеда воздушных линий электропередачи.

Ключевые слова:

Источник отбора мощности, система мониторинга гололедно-изморозевых отложений, трансформатор тока, воздушная линия электропередачи.

Введение

Более 50 % от всех повреждений на воздушных линиях (ВЛ) происходят вследствие гололедно-ветровых воздействий, при этом продолжительность восстановления электроснабжения может составлять более 60 % от общей продолжительности всех аварийных отключений [1]. Недоот-

пуск электроэнергии из-за гололедно-ветровых аварий на локальных территориях страны достигает 70–80 % общего годового недоотпуска из-за отказов по всей стране [2]. Поэтому актуальной остается задача создания и внедрения информационных систем контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи [3].

В настоящее время периферийные посты телеметрии систем мониторинга гололедно-ветровых нагрузок питаются, как правило, от солнечных батарей. Солнечные панели подвержены ряду негативных факторов, таких как неравномерность солнечной активности в течение

дня и года, подверженность загрязнению и обледенению солнечных панелей, деградация фотоэлементов, которые оказывают значительное влияние на снижение эффективности эксплуатации солнечных батарей. Поэтому для повышения эффективности питания постов телеметрии предлагается заменить питание от панели солнечной батареи на питание от источника отбора мощности (ИОМ), который использовал бы рабочий ток провода контролируемой линии. В качестве источника отбора мощности предлагается применять специализированный трансформатор тока (ТТ), монтируемый на провод линии. Энергия вторичной обмотки такого ТТ используется для питания блока электроники поста телеметрии.

Принцип действия такого ТТ сводится к следующему. Первичный ток I_1 в фазном проводе создает в магнитопроводе ТТ магнитный поток Φ , наводящий ЭДС E_2 во вторичной обмотке w_2 , которая вызывает появление тока I_2 во вторичной цепи.

Математическая модель трансформатора источника отбора мощности

Для определения требуемых параметров ТТ в зависимости от получаемой от него мощности необходимо математически описать взаимосвязь между током провода линии и создаваемым им магнитным полем во вторичной цепи ТТ. Данная взаимосвязь описывается первым уравнением Максвелла:

$$\oint_l H dl = \sum I, \quad (1)$$

где H – вектор напряженности контура l ; I – ток, сцепленный с контуром l ; l – средняя длина магнитного пути в кольцевом сердечнике, и законом электромагнитной индукции Фарадея

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где e – ЭДС замкнутого контура l , обусловленная изменением пронизывающего данный контур магнитного потока Φ во времени.

Величина магнитного потока Φ равна

$$\Phi = BS, \quad (3)$$

где B – магнитная индукция; S – площадь поперечного сечения витка контура l .

Величина магнитной индукции B в контуре l связана с напряженностью магнитного поля H следующим соотношением:

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (4)$$

где $\mu \neq \text{const}$ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Учитывая (3) и (4), получаем, что магнитный поток Φ контура l связан с магнитной проницаемостью μ , напряженностью H и площадью S следующим соотношением:

$$\Phi = \mu\mu_0 HS. \quad (5)$$

Из (5) можно сделать вывод, что изменение магнитного потока Φ может быть достигнуто изменением магнитной проницаемости $\frac{d\mu}{dt}$, напряженности поля $\frac{dH}{dt}$ и площадью витка контура $\frac{dS}{dt}$.

Закон полного тока для ТТ согласно (1) запишется как

$$\oint_l H dl = F_{\text{мдс}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{мдс}} = I_1 w_1$ – магнитодвижущая сила, созданная первичным током I_1 .

Из (5) получаем, что напряженность магнитного поля магнитопровода равна

$$H = \frac{I_1 w_1}{l}. \quad (7)$$

Таким образом, из (7) можно сделать вывод, что напряженности поля определяется прямо пропорциональной зависимостью по отношению к току линии $\frac{dI_1}{dt}$, числу витков первичной обмотки $\frac{dw_1}{dt}$ и обратно пропорционально длине контура $\frac{1}{dl}$.

Учитывая (3), (4) и (7), получаем, что магнитный поток в магнитопроводе

$$\Phi = \mu\mu_0 S \frac{I_1 w_1}{l}. \quad (8)$$

Тогда, учитывая (2) и (8), ЭДС первичного контура можно определить следующим образом:

$$e_1 = -\mu\mu_0 w_1 \frac{S dI_1}{l dt}. \quad (9)$$

В соответствии с явлением взаимной индукции и с учетом того, что токи рассматриваемой системы направлены встречно, наводящаяся ЭДС во вторичной цепи, обусловленная первичным током I_1 , определяется как

$$e_2 = M_{21} \frac{dI_1}{dt}, \quad (10)$$

где M_{21} – взаимная индуктивность вторичной и первичной обмоток.

Записав первичный ток в комплексной форме, действующее значение ЭДС взаимной индукции вторичной цепи можно определить как

$$E_2 = j\omega M_{21} I_1, \quad (11)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Взаимная индуктивность первичной и вторичной цепей равна

$$M_{21} = w_1 w_2 \Lambda_M, \quad (12)$$

где Λ_M – проводимость магнитного пути, по которому замыкается основной магнитный поток Φ .

Магнитная проводимость определяется как

$$\Lambda_M = \mu\mu_0 \frac{S}{l}, \quad (13)$$

где $\mu \neq \text{const}$ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Из (11), учитывая (12) и (13), ЭДС на зажимах вторичной обмотки равно

$$E_2 = j\omega w_1 w_2 \mu\mu_0 \frac{S}{l} I_1. \quad (14)$$

Для тороидального магнитопровода площадь поперечного сечения равна [4]

$$S = \eta_{\text{м/пр}} \frac{(D_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{2} h, \quad (15)$$

где h – высота кольцевого сердечника прямоугольного сечения; $\eta_{\text{м/пр}}$ – коэффициент заполнения магнитопровода сталью; $D_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры кольцевого сердечника.

Для магнитопровода выполненного в виде тороида средняя длина магнитного пути равна [4]

$$l = \frac{(D_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{\ln \frac{D_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}}} \pi \approx \frac{(D_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{2} \pi. \quad (16)$$

Подставив в (14) выражения (15) и (16), получим ЭДС вторичной обмотки:

$$E_2 = j2f w_1 w_2 \mu\mu_0 h I_1, \quad (17)$$

где f – частота переменного тока, равная 50 Гц.

Вторичный ток, согласно закону Ома, определяется по формуле

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2 + Z_{\text{н}}}. \quad (18)$$

Учитывая (17), связь между токами первичной и вторичной обмоток определяется следующим выражением:

$$I_2 = j \frac{2fw_1w_2\mu\mu_0hI_1}{Z_2 + Z_H} \quad (19)$$

Учитывая (19), выходное напряжение находится как

$$U_2 = j \frac{2fw_1w_2\mu\mu_0hI_1}{Z_2 + Z_H} Z_H \quad (20)$$

С учетом (19), из (20) имеем

$$S_2 = Z_H \left(j \frac{2fw_1w_2\mu\mu_0hI_1}{Z_2 + Z_H} \right)^2 \quad (21)$$

Сопоставление результатов эксперимента и математической модели

Для экспериментального исследования был взят тороидальный ТТ типа ТЗЛМ со следующими параметрами:

- коэффициент трансформации: 300/5;
- сопротивление вторичной обмотки постоянному току: 4,3 Ом;
- наружный диаметр кольцевого сердечника: 90 мм;
- внутренний диаметр кольцевого сердечника: 130 мм;
- высота кольцевого сердечника: 40 мм;
- первичный ток: 200 А.

Магнитопровод ТЗЛМ выполнен из листовой электротехнической холоднокатаной стали марки Э330, кривая намагничивания взята из [5]. Во вторичную цепь был установлен повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1/10.

Согласно полученным формулам (19–21) был произведен расчет выходной мощности, тока и напряжения в зависимости от изменения нагрузки Z_H , а также экспериментально были выявлены изменения тока, напряжения и выходной мощности в зависимости от изменения нагрузки, представленные на графиках 1–3.

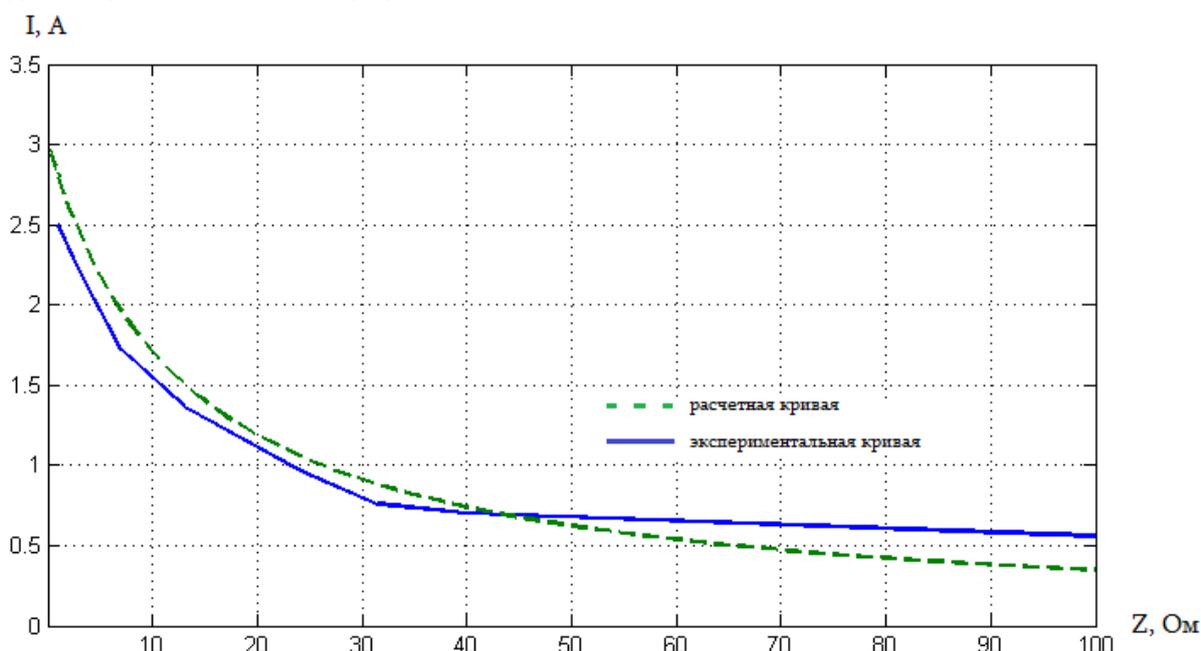


Рис. 1. Изменение тока от величины сопротивления нагрузки

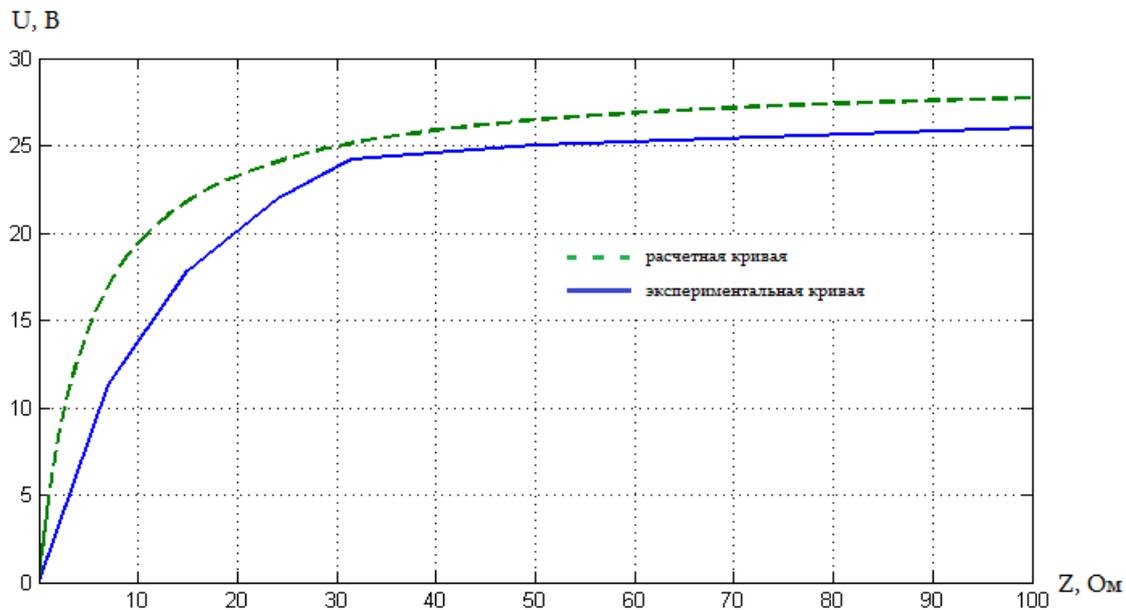


Рис. 2. Изменение напряжения от величины сопротивления нагрузки

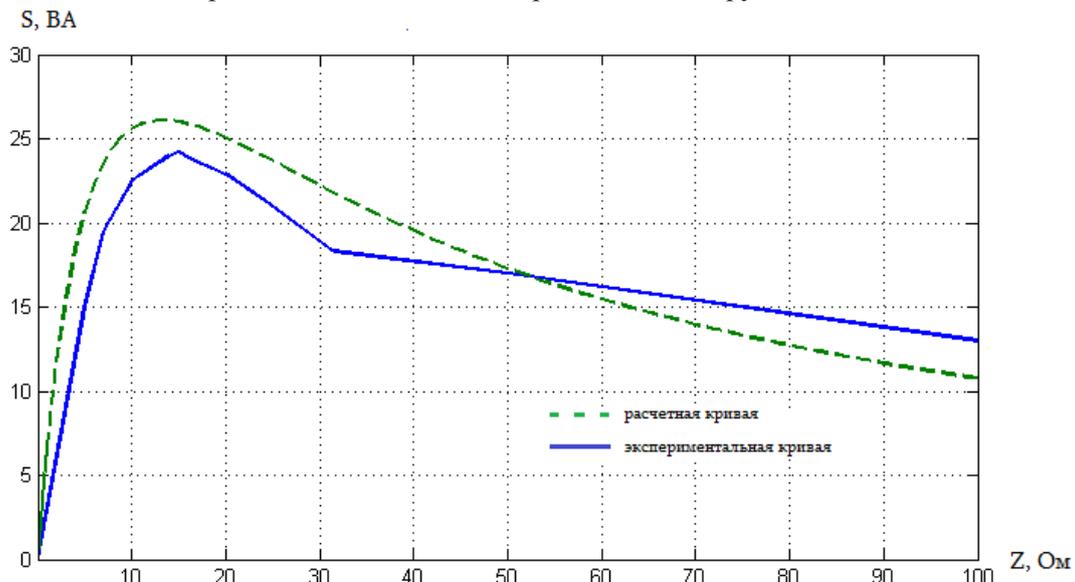


Рис. 3. Изменение выходной мощности от величины сопротивления нагрузки

Выводы

Значение выходной мощности у ТТ в значительной степени определяется величиной и характером нагрузки. По мере увеличения нагрузки от нуля до бесконечности мощность возрастает, затем снижается. Наибольшая мощность получается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению ветви намагничивания трансформатора тока. Различия в полученных экспериментальных и расчетных данных обусловлены тем, что не были учтены потери в повышающем трансформаторе, а также расположение провода в окне трансформатора тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, П.А. Совершенствование мониторинга ВЛЭП при экстремальных метеорологических воздействиях: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2007. – 170 с.

2. Лебедева, Ю.А. Выбор концепций развития воздушных линий электропередачи 110–220 кВ, подверженных экстремальным метеорологическим воздействиям: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2011. – 147 с.
3. Дьяков А.Ф. Проблемы надежности и безопасности энергоснабжения в условиях либерализации и дерегулирования в электроэнергетике // Энергетик. – 2005. – № 8. – С. 2–9.
4. Афанасьев В.В. и др. Трансформаторы тока. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
5. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 450 с.

Поступила 29.01.2015 г.