

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В статье описывается подход к моделированию магнитного поля синхронных генераторов с постоянными магнитами. Высокий интерес в малой энергетике построения автономных источников питания делает актуальными задачи проектирования энергоэффективных конструкций синхронных магнитоэлектрических генераторов, в которых центральное место занимают исследование магнитного поля и определение оптимального закона изменения индукции в рабочем зазоре с последующим расчетом индуцированной электродвижущей силы (ЭДС) в фазных обмотках генератора. Технологическая сложность сборки синхронных генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами, обусловленная значительными силами притяжения между конструктивными элементами якоря и индуктора, требует изготовления дополнительной оснастки и принятия мер безопасности персонала при проведении сборочных работ. В приведенной статье проведено исследование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами с использованием метода конечно-элементного анализа в комплексах программ ELCUT 6.0 и ANSYS Maxwell и предложена методика расчета индуцированной ЭДС в фазных обмотках синхронного генератора. Результаты расчета ЭДС фазных обмоток синхронного генератора сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрическая машина, электродвижущая сила фазной обмотки синхронного генератора, конечно-элементный анализ магнитного поля.

Широкое применение магнитоэлектрических машин во многих отраслях промышленности связано с появлением на рынке доступных постоянных магнитов на основе неодимовых сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой — более 800 кА/м и остаточной индукцией 0,8–1,4 Тл. В малой энергетике повысился интерес к разработке синхронных генераторов с постоянными магнитами. Электрогенератор с ротором на постоянных магнитах может быть построен по двум основным конструктивным схемам: аксиального типа с торцевым расположением постоянных магнитов и коаксиального типа с радиальным расположением магнитов и фазных обмоток статора. Одним из технических решений аксиального типа является разработка электрогенераторов на базе асинхронных электрических машин, у которых короткозамкнутый ротор заменен на индуктор, имеющий в своем составе постоянные магниты. Применение таких генераторов исключает использование редуктора в кинематической схеме комплекса, что позволяет уменьшить массо-габаритные показатели устройства, повысить его надежность и коэффициент полезного действия. Благодаря конструктивным особенностям асинхронной машины, таким как трехфазная обмотка статора, шихтованный магнитопровод и малый рабочий зазор, после замены короткозамкнутого ротора на индуктор с постоянными магнитами приведенное техническое решение обладает высокой технологичностью сборки, причем мощность синхронного генератора

зависит от магнитной индукции в рабочем зазоре в квадратичной степени [1–3].

Рассмотрим конструкцию бесколлекторного магнитоэлектрического генератора, представленного на рис. 1а. Синхронный генератор имеет индуктор 1 с постоянными магнитами 2 и якорь 3, представляющий собой магнитопровод с пазами 4, в которых размещена трехфазная обмотка 5. Индуктор от якоря отделен воздушным зазором  $\delta$  и представляет собой немагнитный цилиндр с расположенными на нем постоянными магнитами, намагниченными в осевом направлении. Число полюсов р индуктора принято равным числу полюсов магнитного поля трехфазной обмотки с током якоря [4].

Результаты расчета плоскопараллельной модели магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами при отсутствии тока в обмотке якоря (режим холостого хода генератора) в комплексе программ ELCUT 6.0 (магнитоэлектростатическая задача) представлены на рис. 1б.

Для моделирования результирующего магнитного поля под нагрузкой необходимо задать скорость вращения индуктора и характер нагрузки. Результаты моделирования результирующей картины магнитного поля с учетом реакции якоря в среде ANSYS Maxwell представлены на рис. 2.

Аналитический расчет индуцированной ЭДС в фазной обмотке генератора по разработанной методике [5] показывает, что мгновенное значение ЭДС в витке будет

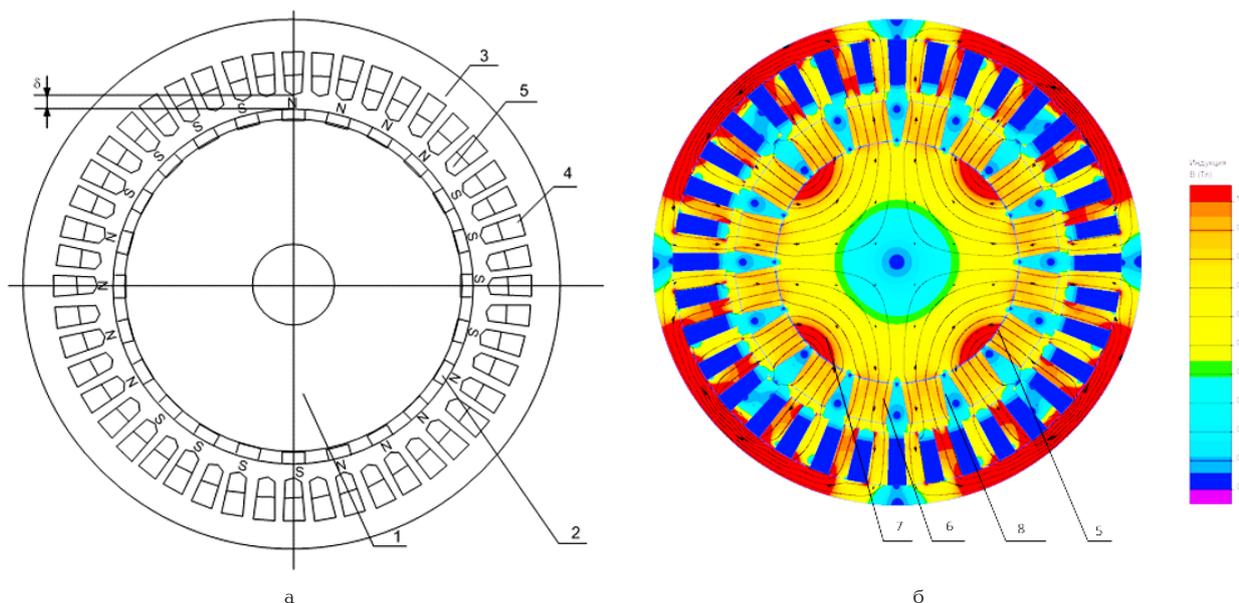


Рис. 1. Конструкция синхронного генератора (а) и картина магнитного поля генератора в режиме холостого хода в комплексе программ ELCUT 6.0 (б)

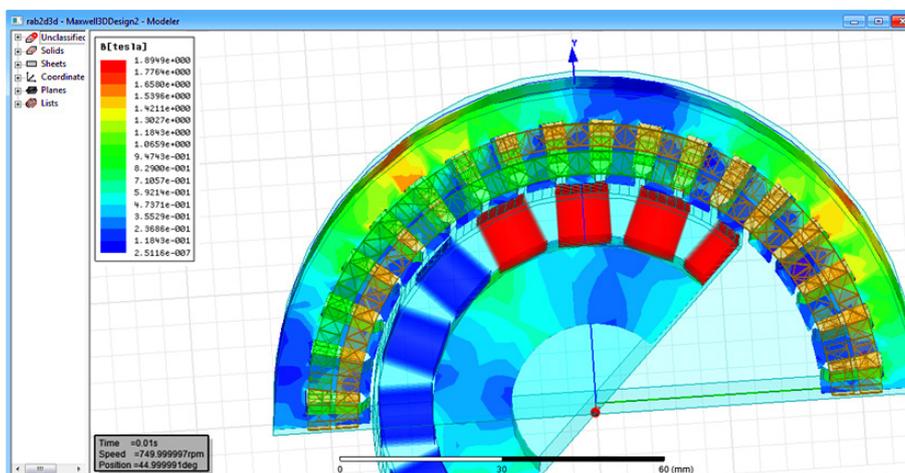


Рис. 2. Распределение вектора магнитной индукции в трехмерной модели магнитной системы синхронного генератора с постоянными магнитами

$$e = E_m \sqrt{1 - \left(1 - \frac{v}{R}\right)^2}. \quad (1) \quad \frac{\pi}{4} < \beta \leq \frac{3\pi}{8}, \quad \frac{3\pi}{8} < \beta \leq \frac{\pi}{2}, \text{ соответственно,}$$

Расчет по полученному выражению позволяет выявить форму временной зависимости ЭДС фазной обмотки синхронного генератора.

Для расчета амплитудного значения ЭДС фазной обмотки генератора используется следующее выражение:

$$E_m = 4k \cdot v \cdot B_{max} \cdot Wd, \quad (2)$$

где  $W$  — число активных проводников в пазу;  $v$  — скорость вращения индуктора, об/мин;  $k$  — число магнитов по длине ротора;  $d$  — диаметр магнита, м;  $B_{max}$  — наибольшее значение индукции, Тл.

В зависимости от угла  $\beta$  поворота индуктора можно определить значения переменной составляющей индуцированной ЭДС в витках фазной обмотки якоря. При изменении угла  $\beta$  значения магнитной индукции будут  $-\frac{\pi}{8} \leq \beta \leq \frac{\pi}{8}$ ,  $\frac{\pi}{8} < \beta \leq \frac{\pi}{4}$ ,

$$B_{01} = \sin(8\beta), \quad B_{01} = -0,815\sin(8\beta),$$

$$B_{01} = 0,815\sin(8\beta), \quad B_{01} = -\sin(8\beta). \quad (3)$$

С учетом геометрического сдвига постоянных магнитов индуктора значения  $B_{02}$  и  $B_{03}$  рассчитываются по (3) для начальных значений  $\beta = -\frac{13\pi}{72}$  и  $\beta = -\frac{17\pi}{72}$  соответственно.

Индуктированное значение ЭДС в фазной обмотке якоря бесколлекторной магнитоэлектрической машины можно определить по формуле

$$E = E_m (B_{01} + B_{02} + B_{03}). \quad (4)$$

На рис. 3 представлены результаты эксперимента опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами (а), аналитического

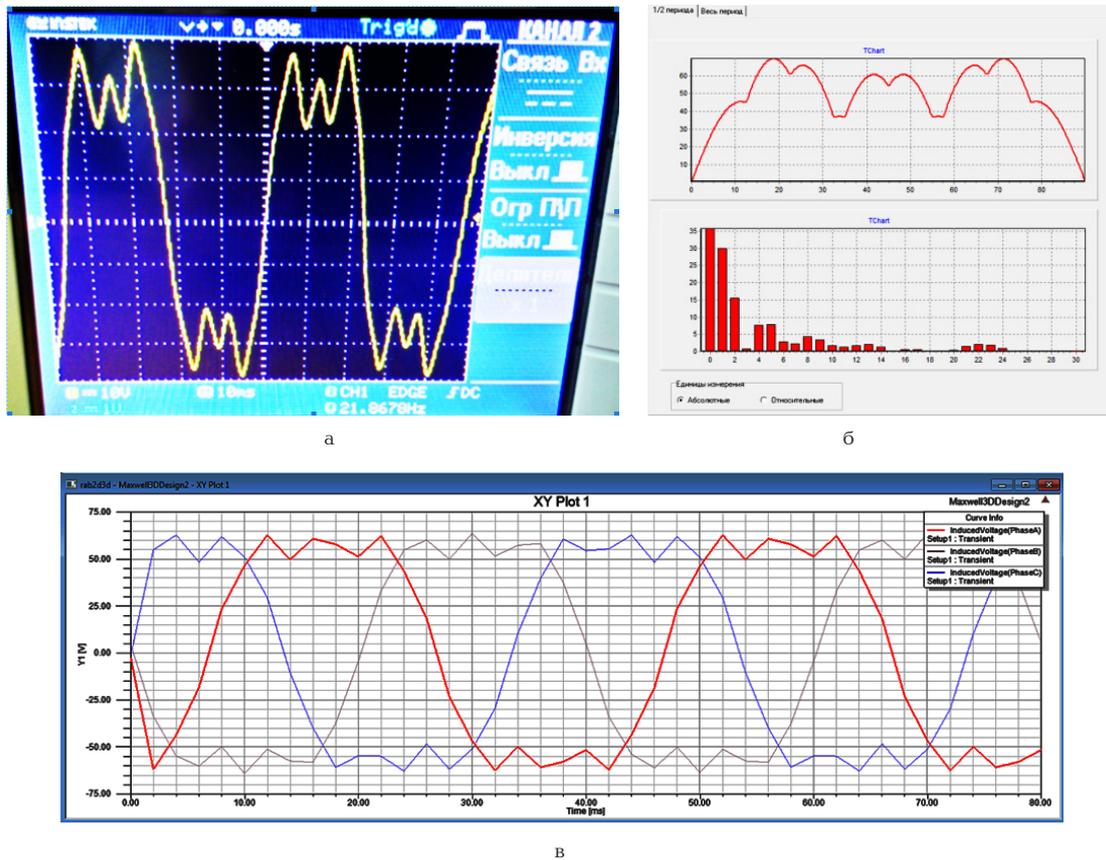


Рис. 3. Временные зависимости индуктированной ЭДС синхронного генератора с постоянными магнитами: а — осциллограмма напряжения фазной обмотки опытного образца синхронного генератора; б — результаты аналитического расчета ЭДС фазной обмотки синхронного генератора; в — временная диаграмма ЭДС фазной обмотки синхронного генератора, полученная на основе численного расчета трехмерной модели его магнитного поля в пакете ANSYS Maxwell

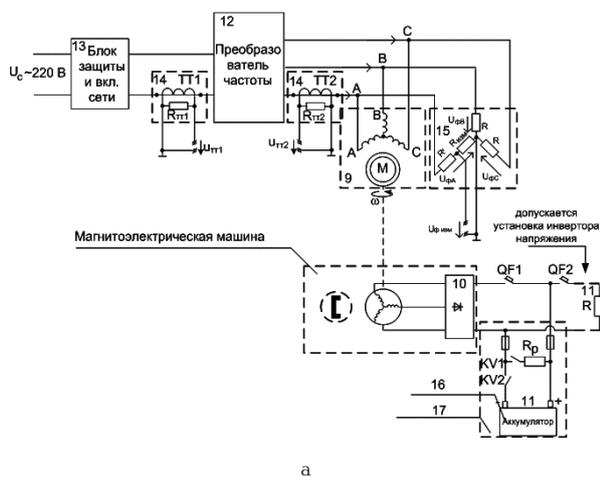


Рис. 4. Электрическая схема (а) и внешний вид лабораторного стенда (б) по исследованию характеристик опытного образца синхронного генератора

расчета ЭДС фазной обмотки якоря (б) и результатов расчета, полученных при исследовании магнитного поля в программном комплексе ANSYS Maxwell (в).

На рис. 4 представлена электрическая схема лабораторного стенда для исследования характеристик опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами. Экспериментальная внешняя характеристика синхронного генератора при различной скорости вращения индуктора пред-

ставлена на рис. 5. Анализ полученных в ходе эксперимента данных позволяет определить оптимальный режим работы опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами (рис. 6).

**Выводы.**

1. Предложена конструкция синхронного генератора, защищенная патентом на полезную модель № 151437 от 10.04.2015.

2. Разработано и зарегистрировано в Фонде интеллектуальной и промышленной собственности

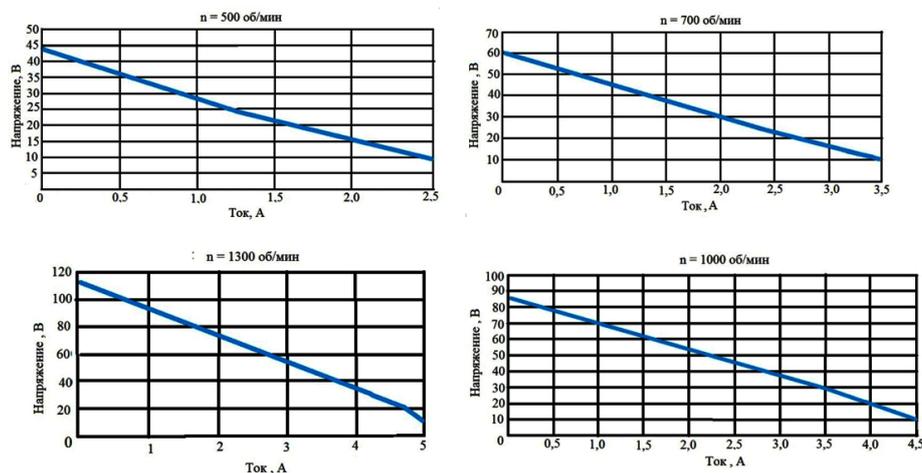


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования внешней характеристики синхронного генератора с постоянными магнитами

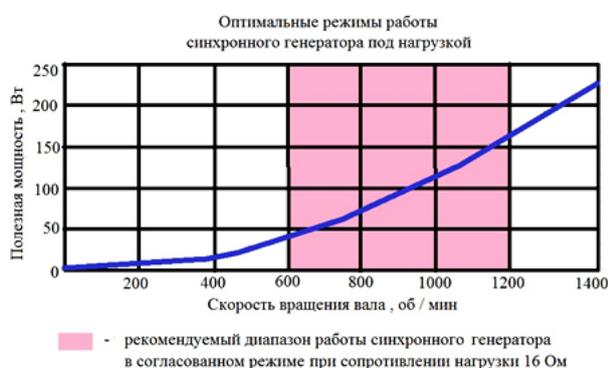


Рис. 6. Область оптимального режима работы синхронного генератора под нагрузкой (заряд аккумуляторной батареи)

программное обеспечение по расчету индуктированной ЭДС в обмотке магнитоэлектрического генератора № 2015612665.

3. Создан опытный образец синхронного генератора на высококоэрцитивных постоянных магнитах из редкоземельного сплава NdFeB.

4. Разработаны лабораторный стенд и методика испытаний синхронного генератора в режимах холостого хода и под нагрузкой.

5. Получены экспериментальные характеристики синхронного генератора под нагрузкой и определены оптимальные условия его работы для обеспечения максимума полезной мощности.

6. Проведенные исследования позволили разработать методику расчета оптимальных конструкций синхронных генераторов полезной мощностью от 1 до 3 кВт.

#### Библиографический список

1. Кулагин, Р. Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами / Р. Н. Кулагин // Известия

Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2011. — № 13 (86). — С. 79–80. — (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7).

2. Корнеев, В. В. Проектирование синхронных машин с постоянными магнитами / В. В. Корнеев ; науч. рук. А. Г. Приступ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 27–28 февр. 2014 г. : тез. докл. — М. : Издат. дом МЭИ, 2014. — Т. 2. — С. 137.

3. Кулешов, Е. В. Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки : автореф. ... канд. техн. наук / Кулешов Евгений Валериевич. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2001. — 20 с.

4. Пат. 151437 РФ, МПК Н 02 К 23/04. Магнитоэлектрическая машина / Татевосян А. А., Татевосян А. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». — № 2014134571 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 04.03.2015.

5. Свидетельство № 2015612665 РФ. Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Татевосян А. А., Огорелков Б. И. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». — № 2014663558 ; заявл. 25.12.2014 ; зарегистр. 24.02.2015. — 1 с.

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрической техники, декан Энергетического института.

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

**МИЩЕНКО Владимир Сергеевич**, магистрант гр. ЭЭМ-152 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: vladimir\_mi@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2016 г.

© А. А. Татевосян, В. С. Мищенко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЯ, РАЗВИВАЕМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ЖЕСТКОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКЦИИ

В статье рассмотрены вопросы влияния различных конструкций устройства гашения колебаний на итоговое усилие, а именно влияния разделения электромагнитных катушек, и добавления участков магнитопровода на усилие, развиваемое на различных ходах сердечника соленоида. Разработана математическая модель устройства и проведено моделирование в режиме свободных колебаний в программном комплексе MATLAB Simulink. Расчет усилий, развиваемых соленоидом в зависимости от конструкции, осуществлялся при помощи программного пакета ELCUT 5.6 Профессиональный. В статье приведена модель компенсатора в виде соленоида и оценивается усилие, развиваемое соленоидом при разных типах его конструкций. Выявлено, что при добавлении в конструкцию соленоида концентраторов электромагнитного поля усилие, развиваемое соленоидом, увеличивается, при расщеплении катушки максимальное усилие снижается, однако увеличивается усилие, развиваемое соленоидом при больших ходах. Сделан вывод о целесообразности применения усовершенствованной конструкции компенсатора жесткости для улучшения характеристики гашения колебаний без изменения потребляемой мощности и изменения габаритных размеров устройства.

**Ключевые слова:** электромагнитный компенсатор жесткости, Simulink, ELCUT, имитационная модель, математическая модель.

Пассивные системы виброзащиты (поддрессори- вания) с постоянными характеристиками транспортных средств являются наиболее распространенными в настоящее время. Потенциальные возможности подобных систем виброзащиты в удовлетворении требований к плавности хода транспортных средств ограничены. Вследствие этого пассивные системы сдерживают повышение виброзащиты водителя, комфортности пассажиров, сохранности перевозимых грузов, виброзащиты собственных агрегатов и узлов транспортного средства и препятствуют росту эксплуатационных скоростей его движения. В связи с этим создание управляемых систем виброзащиты для повышения плавности хода транспортных средств является актуальной проблемой, один из путей решения которой — построение электро- механических виброзащитных систем [1].

Целью данных исследований является рассмотре- ние возможностей повышения демпфирующих свойств системы пассивной виброзащиты за счет дополнения ее управляемым электромагнитным элементом.

В качестве амортизирующих конструкций в ви- брозащитных системах различных объектов могут быть использованы пружинные, гидравлические, пневмогидравлические, пневматические, инерцион- ные, резиновые, пластические амортизаторы. Опыт эксплуатации виброзащитных систем крупногаба-

ритных объектов показал, что весьма перспектив- ными являются пневматические упругие элементы на основе резинокордной оболочки (РКО).

В таких устройствах отсутствует металлический контакт между поддрессоренными и неподдрессо- ренными частями амортизируемого объекта (АО) и передача вибрационных нагрузок осуществляется через резинокордную стенку и сжатый рабочий газ [2]. Подобный амортизирующий элемент имеет мно- жество достоинств, таких как высокая грузоподъ- емность, низкая цена, повышенная плавность хода автотранспортных систем на основе этого элемента. Для улучшения характеристик гашения колебаний в данный пневматический элемент предлагается внести управляемый электромагнитный компен- сатор жесткости соленоидного типа — аналогично техническому решению по патенту № 2481506 [3]. В устройстве используется РКО Н-48.

Для исследования виброзащитной системы рас- смотрены свободные колебания в одностепенной системе. Свободные колебания АО и давление ра- бочего газа пневмоамортизатора (ПА) с электромаг- нитным компенсатором описываются следующей математической моделью [1]:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\frac{k \cdot P \cdot S_3 \cdot \dot{z}}{V_0 + S_3 \cdot z}; \\ M \cdot \ddot{z} + (P - P_0) \cdot S_3 + R_\Sigma \cdot \text{sign} \dot{z} + F_{ЭМ} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P$  — текущее давление рабочего газа (воздуха) в резинокордной оболочке;

$P_0$  — давление в резинокордной оболочке ПА при статическом положении;

$V_0$  — рабочий объем ПА при статическом положении АО;

$M$  — масса АО;

$k$  — показатель адиабаты;

$S_0$  — эффективная площадь ПА;

$z, \dot{z}, \ddot{z}$  — относительные перемещения, скорость и ускорение АО;

$R_\Sigma$  — сила трения в РКО;

$F_{эм}$  — электромагнитная сила, развиваемая компенсатором.

В случае пассивной виброзащитной системы  $F_{эм} = 0$  Н.

$$\text{sign } \dot{z} = \begin{cases} 1 & \text{при } \dot{z} < 0, \\ -1 & \text{при } \dot{z} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

При составлении уравнений приняты следующие допущения:

1. Рабочий газ в ПА подчиняется законам идеальных газов.

2. Температура окружающей среды постоянна и равна  $T_c$ .

3. Рабочий процесс в ПА считается адиабатическим.

4. Движение АО происходит только в вертикальном направлении.

5. Эффективная площадь ( $S_0$ ) ПА при движении АО не меняется.

6. Утечки газа из ПА отсутствуют.

7.  $R_\Sigma = 0,01$  Мг (для случая примененной резинокордной оболочки Н-48, определено экспериментально).

Математическая модель соленоида описывает процессы в электрической подсистеме на основе уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа [4]:

$$\begin{aligned} u &= R \cdot i + \frac{d\psi}{dt}, \\ \psi &= L(x) \cdot i, \\ u &= R \cdot i + L(x) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}, \\ \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L(x)} \cdot \left[ u - R \cdot i - i \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u$  — номинальное напряжение питания соленоида;

$R$  — сопротивление катушки соленоида;

$L(x)$  — индуктивность катушки соленоида;

$i$  — ток в катушке соленоида;

$x$  — координата перемещения сердечника соленоида;

$\psi$  — потокосцепление катушки соленоида.

На основе магнитного сопротивления магнитной цепи соленоида определим его индуктивность в виде зависимости от координаты перемещения сердечника соленоида:

$$R_m = \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot x \cdot d} + \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d} =$$

$$= \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d} \cdot \frac{a+x}{x},$$

$$L(x) = \frac{N^2}{R_m} = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d \cdot N^2}{g} \cdot \frac{x}{a+x} = L' \cdot \frac{x}{a+x},$$

$$L' = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d \cdot N^2}{g}, \quad (4)$$

где  $R_m$  — магнитное сопротивление системы;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;

$N$  — число витков катушки соленоида;

$L$  — индуктивность соленоида;

$a$  — толщина магнитопровода;

$d$  — ширина воздушного зазора в магнитопроводе;

$g$  — величина воздушного зазора между сердечником и катушкой.

Электромагнитная сила определяется в предположении линейной магнитной системы и постоянства тока при изменении координаты перемещения сердечника соленоида:

$$F_{эм} = \frac{dW}{dx} = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{a \cdot L'}{(a+x)^2},$$

$$\frac{dL(x)}{dx} = \frac{a \cdot L'}{(a+x)^2}, \quad (5)$$

где  $W$  — энергия магнитного поля соленоида.

В процессе исследования была создана модель пневмоамортизатора в программном комплексе MATLAB Simulink (рис. 1). Начальные условия для системы: при  $t=0$   $z = z_0 = 0,1$  м,  $\dot{z} = 0$ . В модель введен импульсный электромагнитный генератор силы в качестве компенсатора жесткости, который создаст расчетное противодействующее усилие упругой силы пневмоамортизатора.

Модель позволит определить параметры технического задания для проектирования электромагнитного компенсатора жесткости пневматического упругого элемента виброзащитной системы, ориентированной на нагрузки порядка 1 тонны и более. У данного типа компенсатора следующие преимущества: управляемость, изменяемые параметры усилия, адаптивные характеристики в зависимости от профиля дороги, высокая эксплуатационная надежность, необслуживаемость и др.

Модель соленоида, реализованная в программном комплексе MATLAB Simulink, включена в модель виброзащитного устройства. В ходе исследований использовался неуправляемый импульсный источник питания соленоида с частотой, соответствующей частоте собственных колебаний виброзащитного устройства с амортизируемым объектом, — 1,25 Гц, период — 0,8 с, длительность импульса — 35 % периода, амплитуда импульсов питания — 12 В (рис. 2).

В ходе исследований в комплексе программ ELCUT 5.6 Профессиональный оценивалось влияние различных конструкций магнитопровода и катушки на силу втягивания сердечника. Параметры задачи в ELCUT: тип задачи — магнитостатика, модель осесимметричная, число ампер-витков обмотки — 3330, относительная магнитная проницаемость  $\frac{\mu}{\mu_0}$  обмотки — 1,  $\frac{\mu}{\mu_0}$  электротехнической

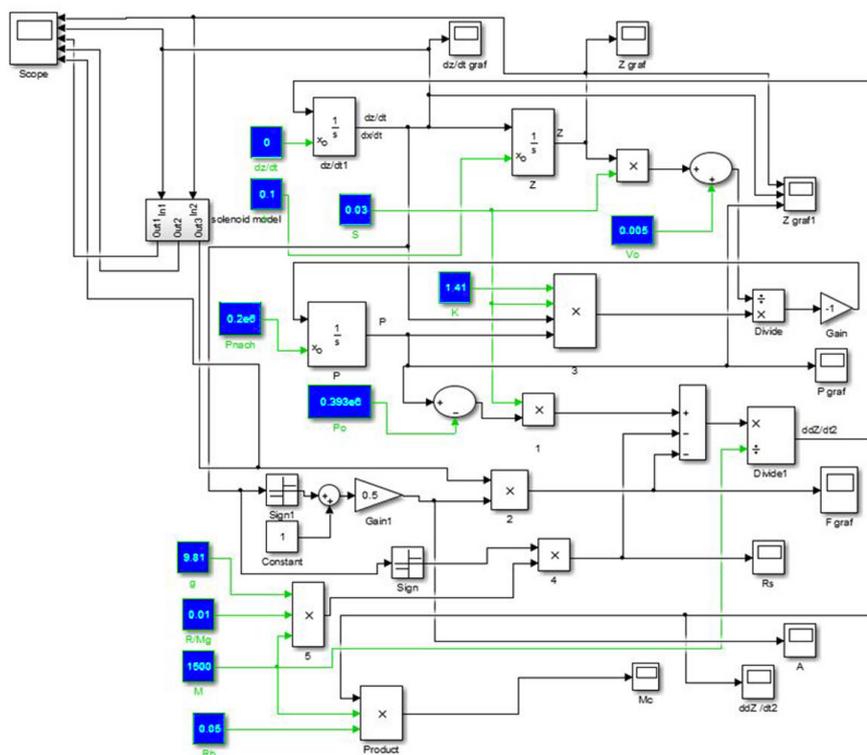


Рис. 1. Имитационная модель пневматического амортизатора с устройством демпфирования колебаний



Рис. 2. Графики перемещения тока в обмотке, напряжения питания и давления в пневматическом амортизаторе соответственно

стали — 4000, модель окружена воздухом, граничные условия — магнитный потенциал, равный нулю.

При расчетах положение сердечника относительно катушки менялось в пределах 0–100 мм, причем при 0 мм сердечник целиком находился в катушке, шаг изменения положения сердечника равнялся 10 мм. Виды конструкций приведены на рис. 3, сравнение результатов расчетов представлено в табл. 1, где А — соленоид с расщепленной обмоткой и ш-образным магнитопроводом, В — соленоид с цельной обмоткой, П-образным магнитопроводом с магнитоконцентраторами и С — соленоид с расщепленной обмоткой, ш-образным магнитопроводом и магнитоконцентраторами. Так-

же усилия наглядно изображены на рис. 4 в виде графиков.

Очевидно, что в транспортных средствах необходимо сделать привязку управляющих сигналов соленоида к одному из регулируемых параметров виброзащитной системы, в качестве которых возможно выбирать, например, вертикальную координату колебаний АО [5], давление рабочего тела в пневмобаллоне [6] и др.

Введение в состав виброзащитного устройства компенсатора жесткости позволяет сократить время свободных колебаний до 25–40 % при использовании компенсатора только на ходе отбоя [7, 8]. Внедрение подобных систем требует дополнительных

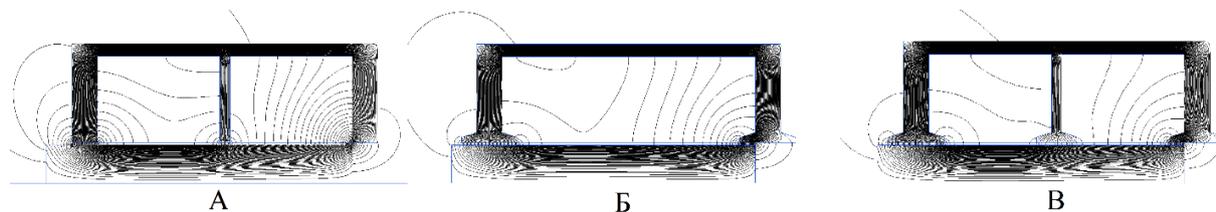


Рис. 3. Виды исследуемых обмоток

Таблица 1

Усилия, развиваемые моделью в зависимости от конструкции магнитопровода

Положение сердечника относительно катушки, мм		0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0
Усилие, развиваемое моделью, Н	А	0,0	211,0	43,0	23,0	23,5	19,0	50,0	19,0	9,0	5,0	2,5
	Б	0,0	333,0	129,0	48,0	30,5	21,5	16,0	11,5	7,0	4,5	2,0
	В	0,0	294,0	80,0	48,0	28,0	25,0	91,0	54,0	12,0	6,0	2,5

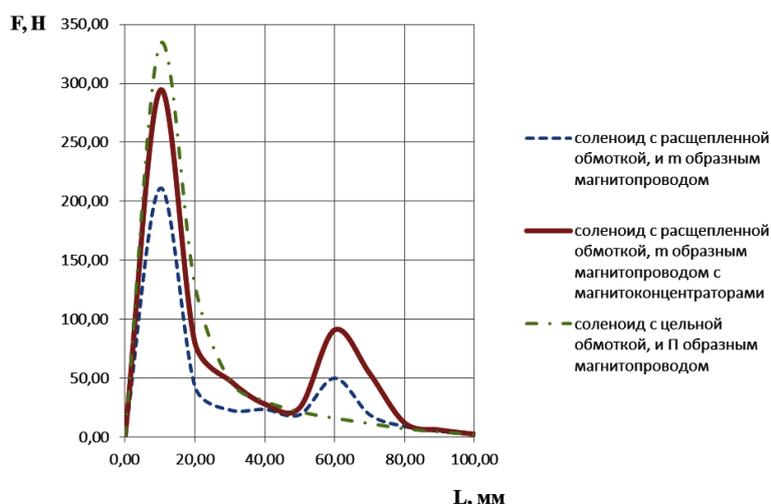


Рис. 4. Графики усилий компенсатора жесткости (F) в зависимости от хода сердечника (L)

исследований возможностей различных конструкций компенсаторов, их оптимизации, алгоритмов их работы в различных дорожных условиях, возможностей системы энергообеспечения транспортного средства.

**Выводы.** Электромагнитный одиночный демпфер соленоидного типа имеет узкий диапазон требуемых значений развиваемого усилия (10–20 мм). Для расширения диапазона можно использовать не только два параллельно работающих соленоидов с различной конфигурацией обмоток, но и доработанные типы конструкций (рис. 3).

Таким образом можно добиться более ровной характеристики усилия и уменьшения времени колебания колебаний. В частности, при использовании одного устройства с однокатушечным соленоидом время гашения колебаний составляет

8,06 секунды, а при использовании устройства с расщепленной обмоткой и концентраторами электромагнитного поля время сокращается до 7 секунд при неизменных требованиях к питанию демпфера и габаритных размерах устройства.

#### Библиографический список

1. Хамитов, Р. Н. Системы амортизации крупногабаритных объектов с активными упругими и демпфирующими элементами : моногр. / Р. Н. Хамитов, Г. С. Аверьянов. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 123 с.
2. Фролов, К. В. Вибрации в технике : справ. В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / К. В. Фролов. — М. : Машиностроение, 1979. — 352 с.
3. Пат. 2481506 РФ, МПК F 16 F 9/04, F 16 F 6/00. Электропневматический амортизатор / Хамитов Р. Н., Аверьянов Г. С.,

Бельков В. Н., Перчун А. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Омский гос. техн. ун-т». – № 2011145781/11 ; заявл. 10.11.2011 ; опубл. 10.05.2013.

4. Архипова, Е. В. Моделирование втяжных броневых электромагнитов и разработка усовершенствованных методик их проектного расчета : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 : защищена 25.12.2014 / Архипова Елена Владимировна. – Чебоксары, 2014. – 228 с.

5. Дьяков, А. С. Активная система пневматического под-рессоривания со ступенчатым изменением жесткости / А. С. Дьяков, А. С. Олейников // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград : ВолГТУ, 2013. – С. 48–49.

6. Хамитов, Р. Н. Система управления и процессы двух-объемного пневмоамортизатора / Р. Н. Хамитов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2010. – № 1. – С. 105–109.

7. Демин, А. В. Электропневматическое виброзащитное устройство / А. В. Демин, Р. Н. Хамитов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–2. – С. 230–234.

8. Демин, А. В. Исследование конструкций электропневматического виброзащитного устройства соленоидного типа / А. В. Демин, Р. Н. Хамитов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2. – С. 112.

**ДЕМИН Александр Владимирович**, аспирант, ассистент кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: deminksander@gmail.com

**ХАМИТОВ Рустам Нуриманович**, доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: apple\_27@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2016 г.

© А. В. Демин, Р. Н. Хамитов

## Книжная полка

**Васильев, Б. Электропривод. Энергетика электропривода : учеб. / Б. Васильев. – М. : Солон-Пресс, 2015. – 272 с. – ISBN 978-5-91359-155-5.**

Дается анализ нормативной базы в области энергосбережения. Показана роль электроприводов в энергосбережении. Рассмотрены вопросы практического энергетического обследования электроприводов и обоснования технико-экономической, энергетической и эксплуатационной эффективности регулируемых электроприводов. Рассмотрены энергетические характеристики электроприводов с асинхронными двигателями и преобразователями частоты, показатели электромагнитной, электромеханической и энергетической совместимости электроприводов и их влияние на энергетику электропривода. Рассмотрены методы повышения энергетических характеристик электроприводов. Рассмотрены вопросы выбора асинхронных двигателей для регулируемых и нерегулируемых электроприводов, преобразователей частоты, тормозных резисторов и других элементов. Приведены примеры использования, структуры и состав оборудования современных электроприводов на промышленных объектах и в технических средствах топливо-энергетического комплекса.

Книга, представленная в виде учебника, предназначена для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и других электротехнических и электроэнергетических направлений подготовки специалистов различных профилей и уровней. Может быть интересна специалистам в области разработки, проектирования и эксплуатации автоматизированного электропривода, энергосбережения.

**Онищенко, Г. Теория электропривода : учеб. / Г. Онищенко. – М. : ИНФРА-М, 2015. – 304 с. – ISBN 978-5-16-009674-2, 978-5-16-100998-7.**

Изложена теория современного автоматизированного электропривода, приведены основы электромеханического преобразования энергии, рассмотрены вопросы передачи механической энергии от вала двигателя к рабочему органу технологической машины, способы преобразования электрической энергии посредством силовых полупроводниковых преобразователей, входящих в состав электропривода. Даны анализ электромеханических характеристик основных типов электродвигателей в установившихся и переходных режимах, способы регулирования координат электропривода; описываются типовые системы регулируемого электропривода, общие методы построения замкнутых систем автоматического регулирования электроприводов, методы расчета и выбора электродвигателей.

Для студентов высшего профессионального образования по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»; может быть использован аспирантами и научно-техническими работниками, специализирующимися в области автоматизированного электропривода.

## УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДОВ ПРИ ВЫБОРЕ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ И САМОНЕСУЩИМИ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ

В работе отображены результаты сравнительного анализа влияния температурной зависимости активного сопротивления проводов повышенной пропускной способности, традиционных неизолированных проводов и самонесущих проводов на выбор мероприятий по снижению потерь электрической энергии. Приведены результаты расчетов экономической эффективности применения компенсации реактивной мощности как мероприятий по снижению потерь в электроэнергетической системе с учетом и без учета температурной зависимости элементов энергетической системы. Сформулированы отдельные закономерности сроков окупаемости компенсирующих устройств в зависимости от нагрузки, типа провода, сечения и длины линии.

**Ключевые слова:** провод повышенной пропускной способности, мероприятия по снижению потерь энергии, температура, компенсация реактивной мощности, самонесущий изолированный провод.

Энергосбережение и повышение энергетической эффективности являются ключевыми, приоритетными направлениями модернизации экономики Российской Федерации. Согласно Постановлению Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 231 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» актуальность проблемы энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России обусловлена значительной энергоемкостью валового внутреннего продукта, которая в 2–2,5 раза превышает аналогичные показатели ведущих стран мира. Вместе с тем, в соответствии с прогнозами Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации на период до 2020 года, предусмотрено снижение энергоемкости российской экономики к 2020 году более чем на 30 %. Указанное снижение должно быть в значительной степени реализовано за счет использования потенциала энергосбережения в электросетевом комплексе России.

Разработка мероприятий, обеспечивающих уменьшение потерь электрической энергии и улучшение качества электрической энергии, является актуальным направлением работ в электроэнерге-

тике [1–4]. Важным мероприятием по снижению потерь электрической энергии представляется компенсация реактивной мощности. В ранее опубликованных работах авторов [5–7] показано, что повышение эффективности компенсации реактивной мощности в плане уменьшения потерь может быть достигнуто на основе учета температурной зависимости активных сопротивлений сети. Цель настоящей работы — выявление общих закономерностей при выборе компенсирующих устройств

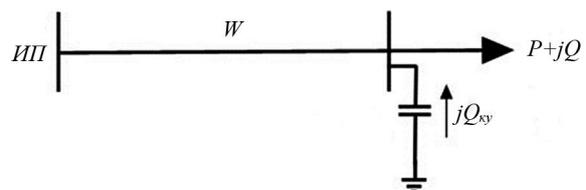


Рис. 1. Неразветвленная сеть: ИП — источник питания; W — линия; P, Q — активная и реактивная мощности нагрузки; Q<sub>кв</sub> — реактивная мощность компенсирующего устройства

## Параметры проводов

Наименование и обозначение параметров	Численные значения (допущения)
Значение сопротивления проводов:	сопротивление при 20 °С
без учета нагрева с учетом нагрева	вычисляется по формуле $R=R_0(1+at_{np})$
Погонное активное сопротивление провода SAX-50 при 20 °С, Ом/км	0,72
Погонное активное сопротивление провода SAX-240 при 20 °С, Ом/км	0,145
Погонное активное сопротивление провода АС-50 при 20 °С, Ом/км	0,5951
Погонное активное сопротивление провода АС-240 при 20 °С, Ом/км	0,118
Погонное активное сопротивление провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 при 20 °С, Ом/км	0,5723
Радиус жилы провода АС-50, АСПТ АТ1/20АС 50/8, мм	4,8
Радиус жилы провода АС-240, мм	10,8
Радиус жилы провода SAX-50, мм	4
Внешний радиус провода SAX-50, мм	6,35
Радиус жилы провода SAX-240, мм	9,05
Внешний радиус провода SAX-240, мм	11,4
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ , °С <sup>-1</sup>	0,00403
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon$	0,6
Температура воздуха $t_a$ , °С	1,7
Атмосферное давление $P_{амм}$ , Па	100 000
Скорость ветра $V$ , м/с	1
Средняя дневная сумма солнечной радиации $E$ , кВт·ч/м <sup>2</sup> ·день	5,5
Количество теплоты, полученное одним метром провода в единицу времени за счет солнечной радиации $W_s$ , Вт/м провода АС-50 и АСПТ АТ1/20АС 50/8	4
Интегрирующий множитель, переводящий потери мощности в потери энергии, $T$ (одинакова для потерь в линии и УКРМ)	5000
Стоимость электроэнергии $C_e$ , руб./(кВт·ч)	2,098
Коэффициент приведения капиталовложений $E_{nr}$ , 1/год	0,14
Норма ежегодных отчислений на ремонт, обслуживание и амортизацию электрооборудования $a_p$	0,059
Удельные потери активной мощности в УКРМ $\rho_{yг}$ , кВт/квар	0,002
Напряжение в узле нагрузки	не меняется
Температура провода при отсутствии УКРМ	близка к максимально допустимой, но не превышает ее
При напряжении 6–10 кВ коэффициент реактивной мощности $tg\phi$	0,4

Оптимальные мощности БСК для провода АС-50  
при мощностях нагрузки  $P = 3300$  кВт,  $Q = 2500$  квар

Длина линии, м	$Q_{кв}$ , квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	З, тыс. руб.		$Q_{кв, опт}$ , квар		$\varepsilon_1$ , %
			без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	
200	900	169,4	220,528	241,847	900	1350	50
	1350	215,2	223,629	240,214			
300	900	169,4	304,491	336,469	1350	1350	0
	1350	215,2	299,867	324,744			
	1500	258,9	305,663	328,738			
380	1350	215,2	360,857	392,368	1350	1800	33
	1500	258,9	365,042	394,271			
	1800	270,9	361,621	387,782			
650	1800	270,9	553,432	598,181	1800	2250	25
	2250	329,6	557,209	597,289			

Таблица 3

Оптимальные мощности БСК для провода АС-240  
при мощностях нагрузки  $P = 9200$  кВт,  $Q = 6100$  квар

Длина линии, м	$Q_{кв}$ , квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	З, тыс. руб.		$Q_{кв, опт}$ , квар		$\varepsilon_1$ , %
			без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	
400	1800	270,9	602,292	651,372	1800	2250	25
	2250	329,6	605,256	650,060			
	2700	391,4	610,848	651,735			
550	2700	391,4	789,466	845,684	2700	3150	16
	3150	449,8	791,067	843,104			
	4000	575,7	804,741	850,790			

Таблица 4

Стоимости и сроки окупаемости установки БСК для провода АС-50  
при мощностях нагрузки  $P = 3300$  кВт,  $Q = 2500$  квар

Длина линии, км	Расчет без учета $t_{np}$			Расчет с учетом $t_{np}$			$\varepsilon_2$ , %
	$Q_{кв, опт}$ , квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ , лет	$Q_{кв, опт}$ , квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ , лет	
200	900	169,4	9,8	1350	215,2	5,0	96
300	1350	215,2	4,2	1350	215,2	2,6	57
380	1350	215,2	2,8	1800	270,9	2,1	35
650	1800	270,8	1,5	2250	329,6	1,2	22

Стоимости и сроки окупаемости установки БСК для провода АС-240  
при мощностях нагрузки  $P = 9200$  кВт,  $Q = 6100$  квар

Длина линии, км	Расчет без учета $t_{np}$			Расчет с учетом $t_{np}$			$\varepsilon_2, \%$
	$Q_{кв, опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{окт}$ лет	$Q_{кв, опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{окт}$ лет	
400	1800	270,9	6,9	2250	329,6	2,4	184
550	2700	391,5	4,1	3150	449,8	1,9	115

Таблица 6

Оптимальные мощности УКРМ для провода АСПТ АТ1/20АС 50/8  
при мощностях нагрузки  $P = 5000$  кВт,  $Q = 3600$  квар

Длина линии, км	$Q_{кв}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	З, тыс. руб.		$Q_{кв, опт}$ квар		$\varepsilon_1, \%$	tgφ	$t_{np}, ^\circ\text{C}$
			без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$			
0,3	2250	488,8	627,556	789,182	2250	2700	17	0,3	103
	2700	585,9	638,085	784,99				0,18	98,4
0,4	2250	488,8	788,583	1004,084	2250	2700	17	0,27	103
	2700	585,9	793,033	988,907				0,18	98,4
0,6	2700	585,9	1102,93	1396,741	2700	3150	14	0,18	98,4
	3150	673,1	1107,842	1385,954				0,9	96
0,8	2700	585,9	1412,827	1804,575	3150	3150	0	0,18	96
	3150	673,1	1410,444	1781,261				0,9	96
	3600	746,8	1424,826	1788,791				0	95,2
1	2700	585,9	1412,827	1804,575	3150	3150	0	0,18	98,5
	3150	673,1	1410,444	1781,261				0,9	96
	3600	746,8	1424,826	1788,791				0	95,2

Таблица 7

Стоимости и сроки окупаемости установки УКРМ для провода АСПТ АТ1/20АС 50/8  
при мощностях нагрузки  $P = 5000$  кВт,  $Q = 3600$  квар

Длина линии, км	Расчет без учета $t_{np}$			Расчет с учетом $t_{np}$			$\varepsilon_2, \%$
	$Q_{кв, опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{окт}$ лет	$Q_{кв, опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{окт}$ лет	
0,3	2250	488,8	3,92	2700	585,9	1,66	136,1
0,4	2250	488,8	2,55	2700	585,9	1,17	117,9
0,6	2700	585,9	1,69	3150	673,1	0,82	106,1
0,8	3150	673,1	1,33	3150	673,1	0,6	121,7
1	3150	673,1	1,02	3150	673,1	0,5	104

Оптимальные мощности БСК для провода SAX-50  
при мощностях нагрузки P = 3300 кВт, Q = 2500 квар

Длина линии, м	$Q_{кв}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	З, тыс. руб.		$Q_{кв,онм}$ квар		$\varepsilon_1$ , %
			без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	
190	900	169,4	89,339	282,008	900	1350	33,3
	1350	215,2	90,132	275,248			
300	1350	215,2	101,119	393,407	1350	1350	0
400	1350	215,2	111,11	500,825	1800	1800	0
	1500	258,9	113,202	498,897			
	1800	270,9	106,47	486,385			
650	1800	270,9	115,723	733,083	1800	2250	24,4
	2250	329,6	115,859	725,705			

Таблица 9

Оптимальные мощности БСК для провода SAX-240  
при мощностях нагрузки P = 9500 кВт, Q = 6700 квар

Длина линии, м	$Q_{кв}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	З, тыс. руб.		$Q_{кв,онм}$ квар		$\varepsilon_1$ , %
			без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	без учета $t_{np}$	с учетом $t_{np}$	
330	1800	270,9	212,173	789,892	1800 или 2250	2700	33,3 или 16,7
	2250	329,6	212,179	778,129			
	2700	391,4	214,840	772,873			
520	3150	449,8	255,264	1122,727	3150	4000	21,3
	4000	575,7	256,145	1105,622			

для линий электропередачи с традиционными, высокотемпературными проводами повышенной пропускной способности и самонесущими изолированными проводами. Анализ вопроса проводится на примере электрической сети напряжением 10,5 кВ (рис. 1) с устройствами компенсации реактивной мощности (УКРМ, БСК).

Исходные данные для анализа приведены в табл. 1.

Результаты исследования по выбору оптимальных мощностей УКРМ (БСК) и сроки окупаемости для различных типов проводов представлены в табл. 2–11 [5–7].

Вычисление степени увеличения оптимальной мощности компенсирующих устройств реактивной мощности с учетом нагрева  $Q_{кв,онм}$  по отношению к оптимальной мощности без учета нагрева  $Q_{кв,онм}$  выполняется по формуле

$$\varepsilon_1 = ((Q_{кв,онм} - Q_{кв,онм}) / Q_{кв,онм}) 100 \% \quad (1)$$

Погрешность определения сроков окупаемости, обусловленная неучетом нагрева  $\varepsilon_2$  вычисляется

по выражению

$$\varepsilon_2 = ((T_{окт} - T_{ок}) / T_{окт}) 100 \% \quad (2)$$

где  $T_{окт}$  и  $T_{ок}$  — сроки окупаемости УКРМ (БСК) с учетом и без учета температуры.

Как следует из материалов табл. 1–11, для различных типов проводов существуют различия по длине и сечению проводов линии, величине емкости и стоимости УКРМ (БСК). Тем не менее можно отметить определенные закономерности, характерные для различных типов проводов.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2–11, позволяет заключить, что для всех типов проводов (АС, SAX, АСПТ) сроки окупаемости, установленные без учета и с учетом нагрева проводов, отличаются значительно (иногда в несколько раз). Средняя погрешность определения сроков окупаемости, обусловленная неучетом нагрева, вычисленная по формуле (2), составляет: 78 % — по самонесущим изолированным проводам SAX (табл. 10, 11), 117 % — по высокотемпературным проводам АСПТ АТ1/20АС (табл. 7) и 110 % — по проводам АС (табл. 4, 5).

Стоимости и сроки окупаемости установки БСК для провода SAX-50 при мощностях нагрузки  $P = 3300$  кВт,  $Q = 2500$  квар

Длина линии, км	Расчет без учета $t_{пр}$			Расчет с учетом $t_{пр}$			$\varepsilon_2, \%$
	$Q_{кв,опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	$Q_{кв,опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	
190	900	169,4	7,04	1350	215,2	3,26	116
300	1350	215,2	3,05	1350	215,2	1,68	81,5
400	1800	270,8	2,25	1800	270,9	1,31	71,8
650	1800	270,8	1,18	2250	329,6	0,86	37,2

Таблица 11

Стоимости и сроки окупаемости установки БСК для провода SAX-240 при мощностях нагрузки  $P = 9500$  кВт,  $Q = 6700$  квар

Длина линии, км	Расчет без учета $t_{пр}$			Расчет с учетом $t_{пр}$			$\varepsilon_2, \%$
	$Q_{кв,опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	$Q_{кв,опт}$ квар	Стоимость БСК, тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	
330	1800	270,9	5,3	2700	391,406	2,71	95,6
520	3150	449,8	2,76	4000	575,722	1,73	59,5

Таким образом, сроки окупаемости по всем типам проводов уточняются примерно на 100 %. Следовательно, погрешность соизмерима с определяемой величиной срока окупаемости. Этот факт подтверждает необходимость учета фактора нагрева проводников линии электропередачи при расчете сроков окупаемости. Особую актуальность приобретает учет температуры при больших нагрузках в сети, так как при увеличении загрузки линии электропередачи погрешность расчета сроков окупаемости увеличивается. Результаты, представленные в табл. 7, наглядно подтверждают этот вывод.

Во всех рассмотренных случаях учет температуры приводит к снижению расчетных сроков окупаемости. Это обусловлено тем, что: 1) фактическая температура проводов значительно больше  $20^\circ\text{C}$ , поэтому активное сопротивление и уровень снижаемых потерь выше, чем без учета нагрева; 2) потери снижаются не только за счет уменьшения реактивной мощности, но и за счет уменьшения активного сопротивления (так как при установке БСК линия разгружается). Вследствие данных факторов расчетное снижение потерь (эффект мероприятия) с учетом нагрева получается выше, чем при традиционных методиках расчета.

Как следует из материалов табл. 2–11, для различных типов проводов оптимальные мощности БСК и сроки окупаемости в целом неодинаковы. Так, погрешность определения сроков окупаемости уменьшается с увеличением длины линии независимо от типа провода и площади сечения. При одинаковых нагрузках ( $P = 3300$  кВт,  $Q = 2500$  квар), длине линии ( $L = 650$  м) и сечении проводов ( $S = 50$  мм<sup>2</sup>)

сроки окупаемости  $T_{ок}$  и их погрешности  $\varepsilon_2$  при мощности БСК 1800 квар достаточно близки: АС-50 —  $T_{ок} = 1,2$  года,  $\varepsilon_2 = 22$  %; SAX-50 —  $T_{ок} = 0,86$  года,  $\varepsilon_2 = 37$  %. Несколько меньшее значение срока окупаемости у изолированного провода обусловлено двумя причинами: 1) материал токоведущей жилы провода SAX имеет более высокое удельное сопротивление по сравнению с проводом АС; 2) наличие изоляции приводит к дополнительному нагреву, что увеличивает потери энергии.

С увеличением передаваемой активной мощности, а следовательно, и температуры сроки окупаемости уменьшаются, а их погрешности увеличиваются примерно на порядок. Данный вывод подтверждают результаты исследования высокотемпературного провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 (табл. 7).

#### Библиографический список

- Шведов, Г. В. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий / Г. В. Шведов, А. Н. Азаров // Электричество. — 2016. — № 2. — С. 11–18.
- Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов / А. В. Дед [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 1 (87). — С. 114–119.
- Горюнов, В. Н. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник / В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов, А. Г. Лютаевич // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2009. — № 6. — С. 20–24.

4. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 191–197.

5. Гиршин, С. С. Учет температуры элементов сети при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / С. С. Гиршин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 137–142.

6. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / А. Я. Бигун [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — С. 212.

7. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2013. — № 1. — С. 284–291.

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

**БИГУН Александр Ярославович**, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: barsbigun@list.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2016 г.

© Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, А. Я. Бигун, В. Н. Горюнов

УДК 621.315

**Д. А. ПОЛЯКОВ**  
**Д. А. ЮРЧУК**  
**Г. А. КОЩУК**  
**К. И. НИКИТИН**

Омский государственный  
технический университет

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрено влияние температуры на полиэтиленовую изоляцию линий электропередачи. На основе известной зависимости константы скорости реакции от температуры определена функция скорости разрушения материала от температуры. Рассчитан срок службы изоляционного материала от температуры. Выявлено, что в области рабочих температур изоляции (до 90 °С) влияние температуры незначительно и срок службы составляет сотни лет, с повышением же температуры он значительно сокращается. В реальных условиях при рабочих температурах срок службы полиэтиленовой изоляции гораздо меньше, что объясняется влиянием электромагнитного поля и других деструктивных факторов.

**Ключевые слова:** электроизоляция, влияние температуры на изоляцию, полиэтилен, полиэтиленовая изоляция, срок службы изоляции, остаточный ресурс изоляции.

**Введение.** В процессе эксплуатации линий электропередачи (ЛЭП) их изоляция подвергается ряду разрушающих воздействий, одним из которых является температура [1–3].

Температура изоляции зависит от следующих факторов:

— величины тока, протекающего по жилам проводов ЛЭП;

— температуры окружающей среды (земли или воздуха);

— внешнего температурного воздействия (например, нагрева под воздействием солнечных лучей);

— наличия дефектов в изоляции, в которых могут появляться частичные разряды [1, 2, 4] и которые способны вызывать нагрев локальных объемов изоляционного материала.

Учет влияния температуры изоляции линий электропередачи позволит определять остаточный ресурс электроизоляционного материала путем расчета аппаратно-программным комплексом на основе данных о факторах, разрушающих изоляцию (в том числе о температуре изоляции) [5, 6].

Для выявления остаточного ресурса изоляции требуется определить зависимость скорости разрушения изоляции и ее остаточного ресурса от температуры, чему и посвящена данная статья.

Скорость реакции при термической деструкции полиэтилена (процесс разрушения макромолекул под влиянием повышенных температур) зависит от температуры. Повышение температуры ускоряет протекание физических и химических реакций, а скорость протекания этих процессов определяет кинетической химической реакцией.

Процессы, протекающие при разрушении полиэтилена под воздействием температуры, можно подразделить на два вида:

— термическая деструкция (разрушение макромолекул полиэтилена под воздействием температуры);

— термоокислительная деструкция (разрушение молекул полиэтилена под воздействием температуры при участии в реакции кислорода). При термоокислительной деструкции происходит усадка изоляции — и в ней появляются поры и трещины.

**Определение скорости разрушения полиэтилена от воздействия температуры.** Скорость деструкции полиэтилена зависит от скорости химических

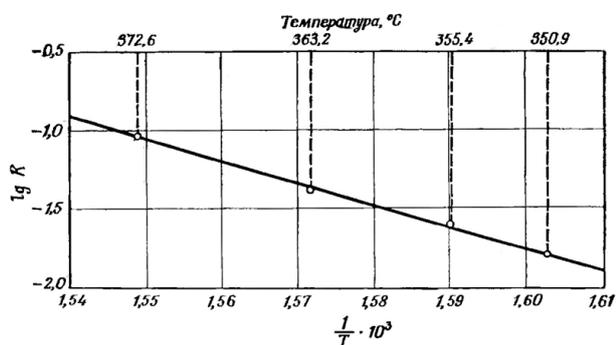


Рис. 1. График Аррениуса для процесса термической деструкции полиэтилена [7]

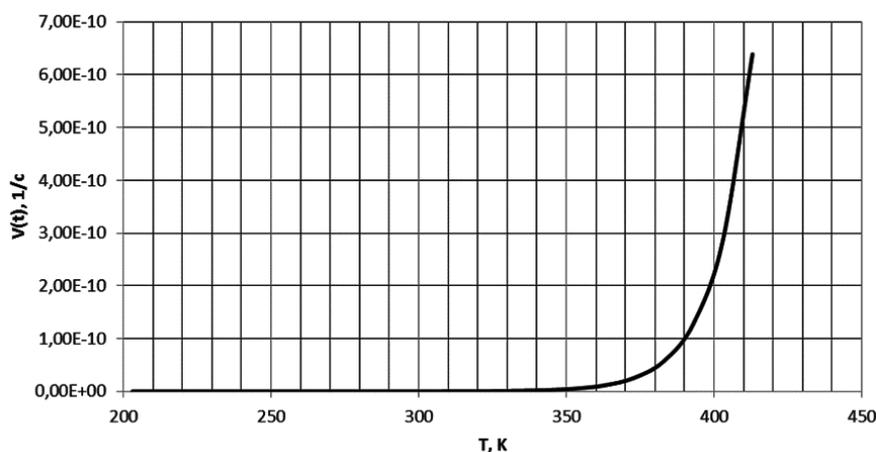


Рис. 2. Зависимость скорости реакции от температуры

реакций, происходящих при его разрушении. Известно, что скорость химических реакций от температуры определяется законом Аррениуса [1]:

$$K_i(T) = K_0 e^{-\frac{W_a}{kT}} \quad (1)$$

где  $W_a$  — энергия активации одной молекулы;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура в кельвинах.

Согласно [1] скорость химических реакций (скорость уменьшения молекул в единице объема вещества) при разрушении изоляции выражается формулой

$$v(t) = -\frac{dN_t}{dt} = K_i N_t, \quad (2)$$

где  $N_t$  — количество молекул вещества в единице объема в данный момент времени.

Отсюда количество молекул вещества в единице объема при постоянной температуре будет выражаться функцией

$$N_t = N_0 e^{-K_i t}, \quad (3)$$

где  $N_0$  — количество молекул вещества в единице объема до начала разрушения.

Ввиду того что температура изоляционного материала (сшитого полиэтилена) в процессе эксплуатации меняется и зависит от многих факторов, учитывая (1)–(3), скорость разрушения материала будет выражаться формулой

$$v(t) = K_i(T) N_0 e^{-K_i(T)t}, \quad (4)$$

где  $K_i(T)$  — коэффициент скорости химических реакций при температуре в данный момент времени.

Согласно (4) число неразрушенных молекул вещества в единице объема следует рассматривать как функцию от скорости разрушения материала:

$$N_t = \int v(t) dt. \quad (5)$$

Определение числа неразрушенных молекул в единице объема вещества требуется для выявления остаточного ресурса изоляционного материала. При использовании указанной методики

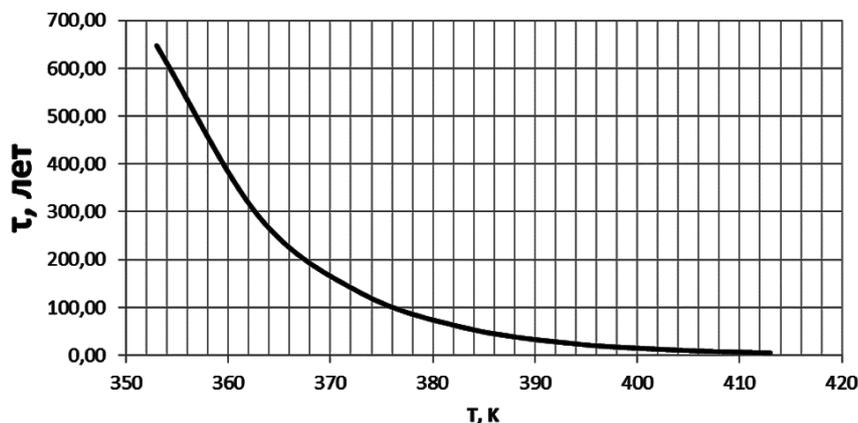


Рис. 3. Срок службы изоляции при неизменной температуре эксплуатации

Таблица 1

T, K	V, 1/c	τ, лет	T, K	V, 1/c	τ, лет
203	3,99E-18	837 859 658,82	313	4,57E-14	73 142,75
213	9,33E-18	358 237 693,91	323	1,07E-13	31 273,12
223	2,18E-17	153 169 142,34	333	2,50E-13	13 371,23
233	5,10E-17	65 489 440,57	343	5,84E-13	5717,04
243	1,19E-16	28 000 854,22	353	1,37E-12	2444,39
253	2,79E-16	11 972 126,05	363	3,20E-12	1045,13
263	6,53E-16	5 118 836,77	373	7,48E-12	446,86
273	1,53E-15	2 188 624,62	383	1,75E-11	191,06
283	3,57E-15	935 774,66	393	4,09E-11	81,69
293	8,35E-15	400 102,51	403	9,57E-11	34,93
303	1,95E-14	171 068,99	413	2,24E-10	14,93

на практике необходимо определить функцию зависимости скорости реакций от температуры (4).

Константу скорости реакции можно рассчитать по графику Аррениуса для процесса термодеструкции полиэтилена (рис. 1).

Для определения зависимости константы скорости реакции от температуры необходимо знать уравнение прямой, представленной на рис. 1, а также координаты двух точек, через которые она проходит.

Примем, что прямая проходит через точки с координатами (372,6; -1,05) и (355,4; -1,7). Температура на графике указана в градусах Цельсия, а для расчета переведем ее в кельвины, прибавив 273 К. Таким образом, получим, что прямая проходит через точки с координатами (645,6; -1,05) и (628,4; -1,7).

Согласно уравнению прямой, проходящей через две точки, получим

$$\frac{T - 645,6}{628,4 - 645,6} = \frac{\lg K_i(T) + 1,05}{-1,7 + 1,05}$$

Отсюда

$$\lg K_i(T) = 0,369 \cdot T - 24,89, \quad (6)$$

где  $T$  — температура в кельвинах.

Отсюда

$$K_i(T) = 10^{0,369T - 24,89}. \quad (7)$$

С учетом (7) скорость реакции от температуры (4) в относительных единицах за одну секунду будет иметь зависимость, представленную на рис. 2.

При использовании статистической модели старения изоляции [8] для общего пробы изоляции требуется разрушить 10 % молекул  $\text{CH}_2$ . Отсюда, учитывая (3), срок службы изоляции от температуры может быть рассчитан по формуле

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{\ln 0,9}{K_i(T) \cdot 8760 \cdot 3600}, \text{ лет}. \quad (8)$$

Срок службы изоляции в области температур выше 80 °С представлен на рис. 3.

Результаты расчета для графиков (рис. 2, 3) представлены в табл. 1.

**Выводы.** Результат расчета срока службы изоляционного материала от температуры показал, что в области рабочих температур изоляции срок службы очень велик и скорость разрушения материала мала, однако при увеличении температуры более 90 °С срок службы существенно сокращается. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации линий электропередачи изоляция подвергается воздействию электромагнитного поля и других деструктивных факторов, которые ускоряют старение изоляции, тем самым дополнительно сокращая срок ее службы. Полученные результаты планируется использовать в дальнейших исследованиях в области определения остаточного ресурса электроизоляционных материалов.

#### Библиографический список

1. Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г. С. Кучинский. — Л. : Энергия, 1979. — 224 с.
2. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь ; под общ. ред. Г. С. Кучинского. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 368 с.
3. Брацыхин, Е. А. Технология пластических масс / Е. А. Брацыхин, Э. С. Шульгина. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л. : Химия, 1982. — 328 с.
4. Вдовико, В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. — Новосибирск : Наука, 2007. — 155 с.

5. Горюнов, В. Н. Опережающий автоматический ввод резерва собственных нужд электрических станций и подстанций / В. Н. Горюнов, К. И. Никитин, М. М. Сарычев // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 211–213.

6. Никитин, К. И. Опережающее автоматическое включение резерва / К. И. Никитин, М. М. Сарычев, В. Д. Степанов, Е. Н. Еремин, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 1 (107). — С. 237–238.

7. Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров / С. Мадорский ; перевод с англ. Д. Г. Вальковского [и др.] ; под ред. С. Р. Рафикова. — М. : Мир, 1967. — 328 с.

8. Никитин, К. И. Определение срока службы изоляции / К. И. Никитин, Д. А. Поляков // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 3. — С. 129–132.

**ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич**, ассистент, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники.

**ЮРЧУК Дмитрий Анатольевич**, студент гр. Э 136 Энергетического института.

**КОЩУК Галина Андреевна**, ассистент кафедры теоретической и общей электротехники.

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники.

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2016 г.

© Д. А. Поляков, Д. А. Юрчук, Г. А. Кощук, К. И. Никитин

## Книжная полка

**Быстрицкий, Г. Общая энергетика / Г. Быстрицкий. — 3-е изд., стер. — М. : КноРус, 2016. — 296 с. — ISBN 978-5-406-02763-9.**

Приведены сведения о невозобновляемых и возобновляемых энергетических ресурсах, их характеристики; рассмотрены основы теплотехники: положения технической термодинамики и основы теплообмена. Даны схемы и принципы работы тепловых электрических станций, газотурбинных установок, АЭС, гидравлических и ветровых электрических станций. Представлено основное тепловое оборудование ТЭС: паровые и водогрейные котлы, паровые турбины и нагнетательные машины. Соответствует федеральному государственному образовательному стандарту среднего профессионального образования третьего поколения.

Для студентов учреждений среднего профессионального обучения, может быть использовано студентами электротехнических специальностей вузов, а также работниками электростанций и промышленности.

**Михеев, Г. Электротехника и энергетика. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г. Михеев. — М. : ДМК Пресс, 2015. — 298 с. — ISBN 978-5-97060-268-3.**

В книге приводятся традиционные и новые ресурсосберегающие методы и устройства диагностики подстанционного оборудования электростанций и электрических сетей энергосистем, такого как силовые трансформаторы на классы напряжения 35...750 кВ и установленные на них регуляторы под нагрузкой, а также высоковольтные выключатели 6...500 кВ и разрядники 35...500 кВ.

Книга рассчитана на инженерно-технический персонал предприятий, электростанций и электросетей, выполняющий работы по ремонту, эксплуатации и диагностике высоковольтного электрооборудования, а также на научных работников, студентов и аспирантов, занимающихся вопросами диагностики и контроля мощных силовых трансформаторов, коммутационных аппаратов, средств защиты от перенапряжения.

## О ВЛИЯНИИ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПАЗОВЫЕ ГАРМОНИКИ СТАТОРНОГО ТОКА

**В статье приведены результаты анализа влияния наиболее частых дефектов электромагнитной системы на спектр тока статора, в том числе рассмотрены зависимости воздействия глубины дефектов на пазовые гармоники. Результаты анализа могут быть использованы при разработке бездатчикового устройства для определения частоты вращения ротора асинхронных двигателей.**

**Ключевые слова:** пазовые гармоники, дефекты асинхронного двигателя, спектр тока статора, дефекты ротора, дефекты статора, статор.

В настоящее время сохраняет актуальность задача определения частоты вращения ротора асинхронных двигателей, обусловленная необходимостью постоянного контроля за работой присоединенных механизмов. Обычно для контроля частоты вращения ротора используют оптические, индукционные либо основанные на эффекте Холла датчики обмоток.

Отрицательной стороной этих датчиков является то, что необходим определенный опыт в их установке и настройке; кроме того, увеличивается количество соединительных проводов. Также датчик может выйти из строя и нарушить работоспособность системы.

Решением данной проблемы могут стать бездатчиковые устройства для определения частоты вращения ротора, которые зачастую используют уже имеющиеся в системе управления двигателем токовые трансформаторы и датчики напряжения, установленные в силовом шкафу. Тогда возможно использовать устройство, размещающееся в любом месте на линии питания двигателя и определяющее частоту его вращения.

За последнее время были разработаны различные бездатчиковые методы определения частоты вращения асинхронных двигателей. В большинстве случаев либо используется математическая модель данного двигателя, либо производится анализ компонент спектра напряжения или тока двигателя.

Методы, использующие математическую модель двигателя, дают преимущества в скорости обработки данных; однако для их работы требуется большое количество исходных данных, которые не всегда доступны пользователю. Большой вклад в развитие таких методов внес Ю. З. Ковалев и его последователи, например А. Ю. Ковалев, Н. А. Ковалева, А. Г. Щербакова [1], занимавшиеся разработкой математических моделей двигателей. Существенную роль в развитии этого направления сыграли и ученые Томского политехнического университета, в частности А. С. Глазырин и его ученики [2].

Методы, основанные на спектральном анализе сигнала тока и (или) сигнала напряжения, обычно используют известные из паспорта параметры двигателя, например число полюсов, номинальное скольжение, частоту питания. Однако эти методы требуют большого количества вычислений, в основном из-за необходимости вычислять спектры сигналов. Тем не менее, принимая во внимание скорость развития вычислительных устройств, в частности специализированных сигнальных процессоров, позволяющих с высокой скоростью вычислять быстрое преобразование Фурье, наиболее перспективными могут считаться именно эти методы. Как показывают эксперименты, погрешность вычисления такими методами относительно датчика частоты вращения, установленного на валу двигателя, может составлять менее сотых долей процента [3]. Наибольшее число работ по данной тематике было опубликовано за рубежом такими исследователями, как М. Е. Н. Benbouzid, К. D. Hurst, Т. G. Habetler, М. Aiello, А. Cataliotti и др.

Основной метод, использующий поиск особых спектральных компонент в токе статора, является нахождение так называемых пазовых гармоник [4]. Появление этих гармоник описывается следующим физическим процессом.

Магнитный поток протекает через магнитопровод статора сквозь воздушный зазор между ротором и статором, далее через магнитопровод ротора и возвращается через зазор обратно в статор. Пазы в статоре, содержащие статорную обмотку, и пазы в роторе, содержащие роторную обмотку, образуют контур магнитного потока. Магнитопровод обладает большей магнитной проводимостью, чем воздух в воздушном зазоре, медь и алюминий, из которых изготавливаются обмотки. Таким образом, магнитный поток будет протекать именно через магнитопровод, оказывающий некоторое сопротивление. Это сопротивление магнитной проводимости изменяется при прохождении пазов ротора над пазами статора, что ведет к модуляции главной гармоники тока с частотой, зависящей от числа пазов ротора.

Частота расположения пазовых гармоник на спектре тока статора описывается формулой [4]

$$f_{nc} = f_1 \left( R \frac{1-s}{p} \pm k \right), \quad (1)$$

где  $f_1$  — частота питания сети;  $p$  — число пар полюсов двигателя;  $R$  — число пазов ротора;  $s$  — скольжение;  $k$  — порядок гармоники, целое 1, 3, 5...

Данное явление используется в различных методах бездатчикового определения угловой скорости и положения вала асинхронного двигателя [4, 5 и др.], однако исследование влияния различных

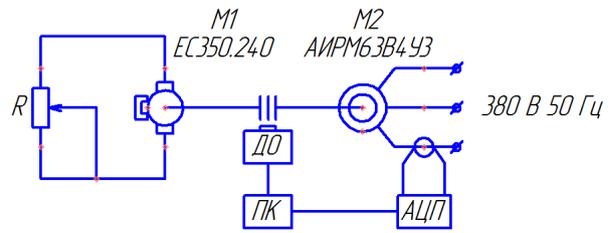


Рис. 1

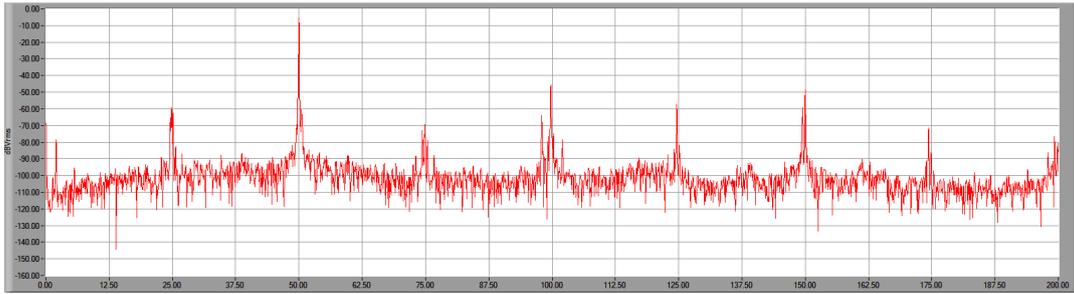


Рис. 2

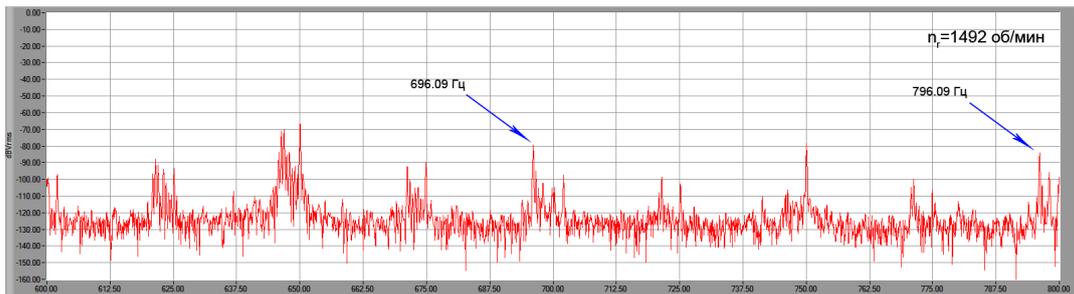


Рис. 3

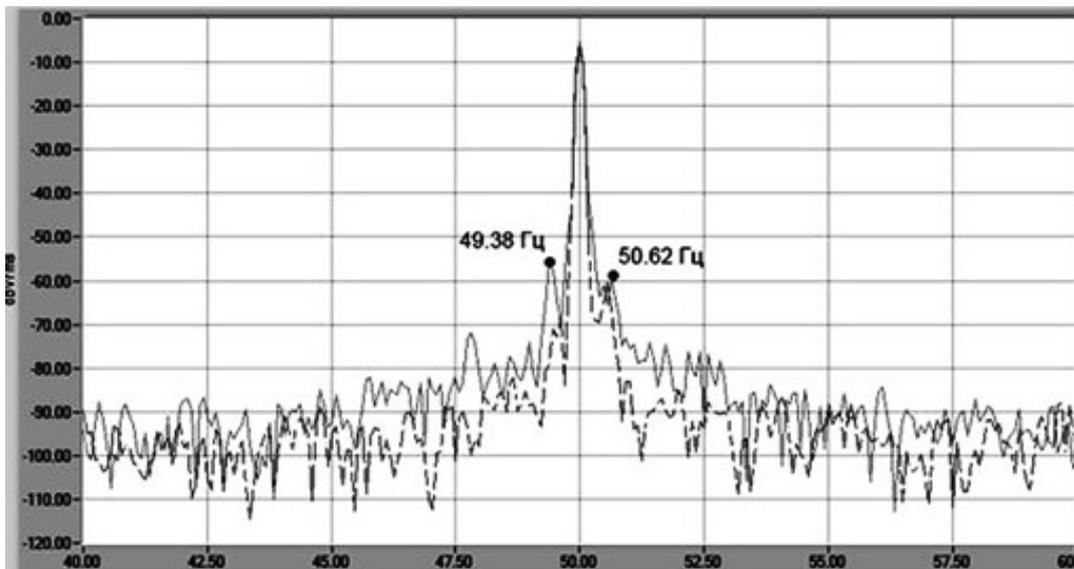


Рис. 4

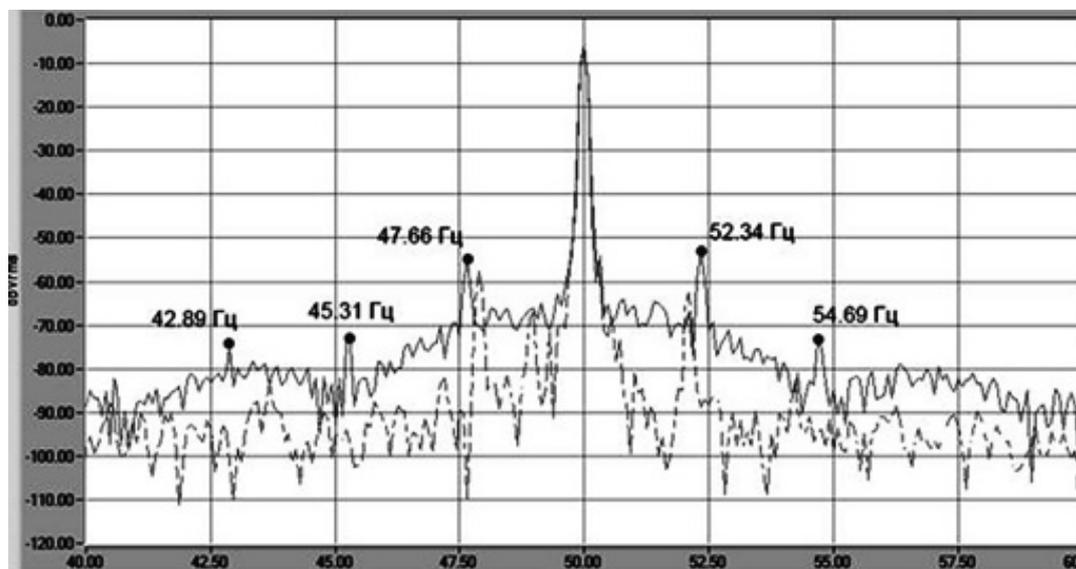


Рис. 5

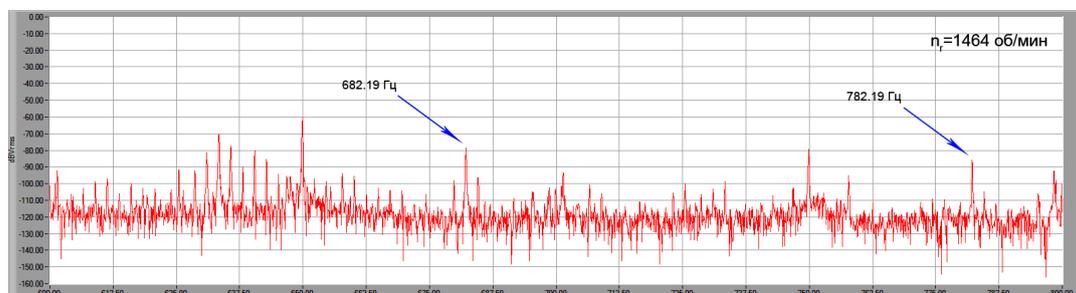


Рис. 6

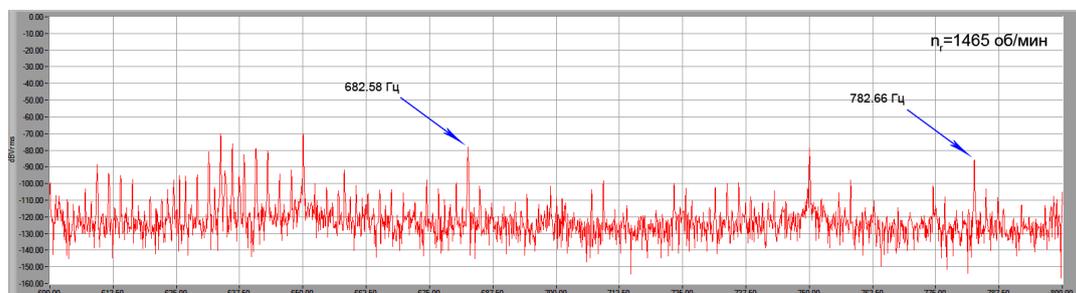


Рис. 7

дефектов двигателя на их работу ранее не проводилось. В данной статье проводится анализ такого влияния, а также приводятся типичные картины спектров при конкретном виде дефектов и формулы для расчета спектральных компонент, вызванных этим дефектом.

Для получения опытных данных была собрана лабораторная установка, состоящая из асинхронного двигателя М2 АИРМ63В4УЗ, имеющего две пары полюсов и число пазов ротора, равное 30, а также генератора М1 постоянного тока, нагруженного на реостат R. Генератор и двигатель соединены гибкой муфтой. Частота вращения ротора измеряется с помощью датчика Холла. Сигнал тока статора снимается с помощью токовых клещей Fluke i5s, установленных на одной из фаз асинхронного дви-

гателя. Оцифровку преобразованного сигнала тока выполняет система сбора данных фирмы L-Card LTR-EU-2 с модулем АЦП LTR22. Частота дискретизации во всех опытах составляет 78,125 кГц. Спектр тока получен с помощью программного обеспечения LGraph2 фирмы L-Card. Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.

При питании бездефектного асинхронного двигателя от трехфазной сети переменного тока напряжением синусоидальной формы величина потребляемого тока в обмотках статора определяется режимом его работы, а форма в небольших пределах отличается от формы гармонического сигнала. В спектрах тока статора любой из фаз двигателя присутствует только основная составляющая с частотой питающего напряжения и ряд нечетных

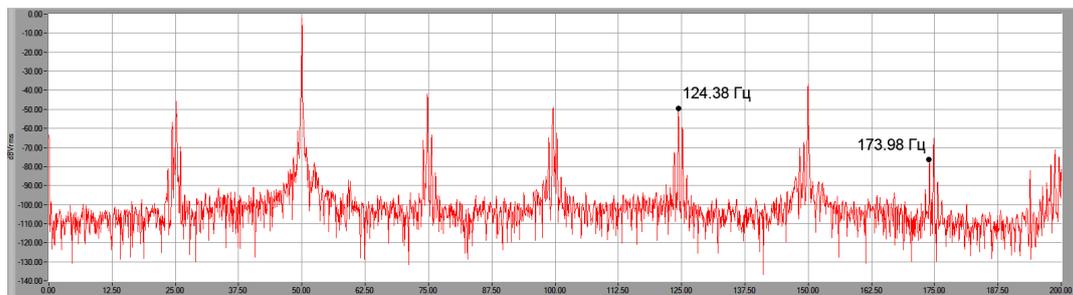


Рис. 8

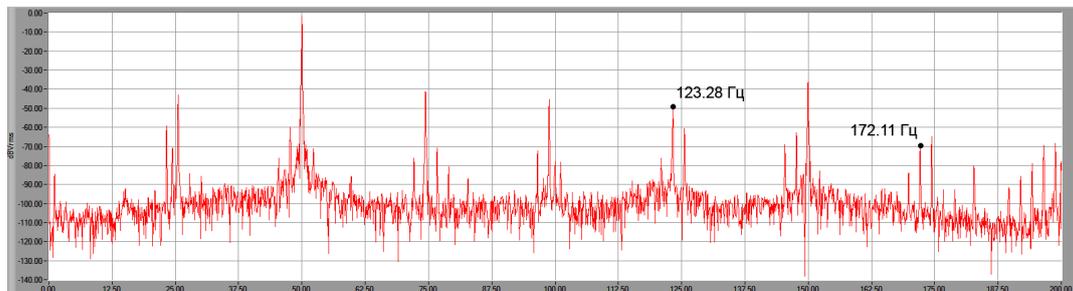


Рис. 9

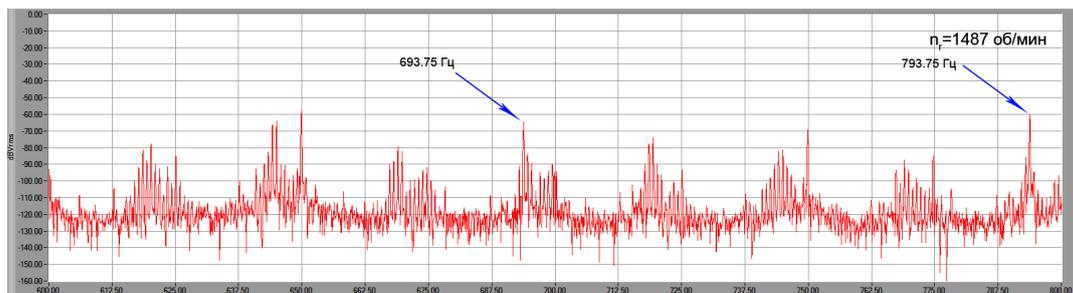


Рис. 10

гармоник с частотами  $(6n \pm 1)f_1$ , определяемыми дискретностью фазовых обмоток статора, распределенных по пазам [7]. Спектр тока статора в диапазоне низких частот выглядит, как показано на рис. 2, а в диапазоне расположения пазовых гармоник — как на рис. 3.

В первом опыте моделировали влияние нарушения обмотки ротора на появление пазовых гармоник в токе статора двигателя, для чего просверливали в роторе асинхронного двигателя отверстие диаметром 5 мм на глубину паза. После этого двигатель с дефектным ротором был установлен на стенд и произведен съем сигнала тока с нагрузкой и без нее.

Объяснения появления особых спектральных компонент в токе статора, указывающих на дефект ротора, приведены в различных работах [8, 9] и описываются формулой

$$f_b = (1 \pm 2ks) \cdot f_1. \quad (2)$$

На рис. 4 показаны спектры тока исправного (прерывистой линией) и дефектного (сплошной линией) двигателя при работе на холостом ходу. Замеренная скорость вращения ротора в этом режиме составила 1490,8 об/мин.

На рис. 5 показан спектр тока статора при работе под нагрузкой, при этом новая частота вращения ротора составляет 1464,5 об/мин. В спектрах видны компоненты, частоты которых вычисляются из формулы (2). Из полученных результатов можно сделать вывод, что амплитуда этих спектральных составляющих усиливается при увеличении нагрузки на двигатель. На рис. 6 приведен спектр тока в диапазоне расположения пазовых гармоник при работе двигателя под нагрузкой с одним отверстием в роторе, а на рис. 7 — с тремя. Как видно из приведенных спектров, дефекты ротора не влияют на появление пазовых гармоник и не изменяют их расположение на частотной оси.

Во втором опыте моделировали влияние межвитковых замыканий в обмотке статора на пазовые гармоники, для чего в статорную обмотку вводили дефект путем спаивания двух соседних витков. Место для дефекта было выбрано случайным образом в обмотке фазы С. После этого место пайки было заизолировано и двигатель был собран.

Долю замкнутых витков трудно определить на глаз, поэтому с помощью RLC-метра E7-22 были замерены значения сопротивлений и индуктивностей обмоток всех фаз. Сопротивление обмотки фазы С уменьшилось относительно других фаз на 28%, а индуктивность — на 26%. Это может

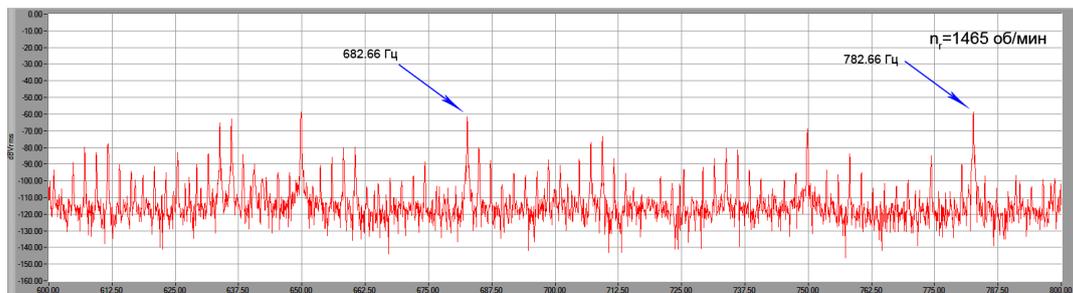


Рис. 11

Таблица 1

Неисправность	Частота
Эксцентриситет воздушного зазора	$f_{ag} = \left\{ (n_r R \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n_{es} \right\} f_1$
Точечные дефекты подшипника	$f_{bearing} =  f_1 \pm k \cdot f_v $
Дефекты редуктора	$f_e = f_1 \pm k \cdot f_{sh}$
Несоосность валов двигателя и нагрузки	$f_m = f_1 \pm k \cdot f_r$
Повреждения ременной передачи	$f_{str} = \pi \cdot f_{sk} \frac{D_{sk}}{L_{sk}}$
Повреждения приводимого оборудования	$f_l = f_1 \pm k \cdot f_l \cdot N_l$
Ослабление крепления на фундаменте	$f_f = f_1 \pm k \frac{f_f}{2}$

**Примечание:**  $n_r$  — целое 0, 1, 2, 3...;  $n_d$  — порядок эксцентриситета, целое 0, 1, 2, 3..., при  $n_d = 0$  статический эксцентриситет, при  $n_d = 1, 2, 3$  динамический;  $n$  — порядок гармоники магнитодвижущей силы статора, четное целое 1, 3, 5...;  $k = 1, 2, 3...$ ;  $f_v$  — одна из характеристических частот, которая основана на конструкции подшипника;  $f_r$  — скорость ротора в герцах;  $f_{sh}$  — частота вращения вала редуктора;  $f_{sk}$  — частота вращения шкифа;  $D_{sk}$  — диаметр шкифа;  $L_{sk}$  — длина ремня;  $f_l$  — частота вращения рабочего колеса;  $N_l$  — количество лопаток рабочего колеса, количество поршней в цилиндропоршневой группе и т.д.

свидетельствовать о примерно 27% замкнутых витков, что является довольно сильным дефектом. После этого двигатель был поставлен на стенд и произведен съем сигнала тока статора.

Частотные компоненты, показывающие в спектре тока присутствие короткозамкнутых витков, могут быть найдены по формуле [10]

$$f_{sc} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right\}, \quad (3)$$

где  $k$  — порядок гармоники, целое 1, 3, 5...;  $n$  — целое 1, 2, 3...

На рис. 8 показан спектр двигателя с межвитковым замыканием при работе в режиме холостого хода, а на рис. 9 — в режиме нагрузки. Как видно, относительно спектра исправного двигателя (рис. 2) появились дополнительные спектральные компоненты, которые рассчитываются из формулы (3). Вместе с тем были получены спектры в частотном диапазоне расположения пазовых гармоник,

отображенные на рис. 10 (в режиме холостого хода) и рис. 11 (под нагрузкой). Из полученных спектров можно сделать вывод, что хотя и наблюдается появление дополнительных спектральных составляющих, вызванных дефектом статорной обмотки, пазовые гармоники все еще присутствуют в спектре и корректно указывают на текущую частоту вращения двигателя, однако такой богатый гармонический состав может усложнить работу автоматизированных алгоритмов поиска пазовых гармоник.

В табл. 1 приведены формулы характеристических частот для других видов дефектов, в том числе для дефектов приводимого оборудования. Частотные компоненты, вызванные такими неисправностями, обычно лежат в области низких частот спектра тока статора и не влияют на амплитуду и частоту пазовых гармоник.

Основываясь на вышеизложенных данных, можно сделать вывод, что неисправности электромагнитной системы асинхронных двигателей не влияют на расположение пазовых гармоник

на частотной оси спектра, а следовательно, не искажают вычисленную частоту вращения ротора. Однако они вносят дополнительные спектральные составляющие в диапазон расположения пазовых гармоник, которые могут влиять на работу автоматических алгоритмов расчета частоты вращения двигателя. Данную проблему можно решить, используя специальные методы выделения пазовых гармоник из спектра сигнала.

#### Библиографический список

1. Ковалев, Ю. З. Построение математических моделей электротехнических комплексов и систем в системном анализе : препринт / Ю. З. Ковалев, А. Ю. Ковалев, Н. А. Ковалева, А. Г. Щербаков. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007. — 44 с.
2. Глазырин, А. С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором / А. С. Глазырин // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — № 4. — С. 107–111.
3. Скляр, А. В. Оценка частоты вращения ротора вспомогательных асинхронных двигателей методом сигнатурного анализа тока статора / А. В. Скляр // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. В 3 ч. Ч. 1 / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2015. — 377 с.
4. Arabaci, H. An artificial neural network approach for sensorless speed estimation via rotor slot harmonics, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, pp. 1076–1084, 2014.

5. Ertan Hulusi Bulent, Keysan, Ozan, «Speed and rotor position estimation of electrical machines using rotor slot harmonics or higher order rotor slot harmonics», EU patent 2556381 B1, filed April 5th, 2010, published May 7th, 2014.

6. Bin Lu, Santosh Kumar Sharma, Ting Yan, Steven Andrew Dimino, «System and method of speed detection in an induction machine», US patent 20140009102 A1, filed September 10th, 2013, published January 9th, 2014.

7. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А. В. Барков [и др.]. — СПб. : Спектр, 2012. — 67 с.

8. Neelam Mehala. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis // Electrical engineering department national institute of technology. Kurukshetra, p. 175, 2010.

9. S. Nandi and H. A. Toliyat. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines — a review, in Proc. 34th Annual Meeting of the IEEE Industry Applications, pp. 197–204, 1999.

10. Benbouzid, M. E. H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, October, № 5, pp. 984–993, 2000.

**СКЛЯР Андрей Владимирович**, аспирант кафедры автоматизации и систем управления.

Адрес для переписки: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Статья поступила в редакцию 12.04.2016 г.

© А. В. Скляр

## Книжная полка

### 621.1 М69

**Михайлов, А. Г. Теоретические основы теплотехники : учеб. текстовое электрон. изд. локального пространства : практикум / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Приведены задачи, примеры и методы их решения, лаконично и последовательно изложены теоретические основы теплотехники, знание которых необходимо для решения задач прикладной теплотехники. Практикум предназначен студентам энергетических направлений подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

### 621.311/К88

**Кудинов, А. А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. 13.03.01 (140100) «Теплоэнергетика и теплотехника»/ А. А. Кудинов. — М. : ИНФРА-М, 2015. — 323 с. — ISBN 978-5-16-004731-7.**

Изложены основы теории повышения тепловой экономичности электростанций за счет применения пара высоких и сверхвысоких параметров, комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, регенеративного подогрева питательной воды, промежуточного перегрева пара, использования газотурбинных и парогазовых установок. Описаны принципиальные тепловые схемы современных ТЭС, освещены вопросы выбора основного и вспомогательного оборудования, расчета тепловых схем, компоновки главного здания, технического водоснабжения и подготовки добавочной воды, топливного хозяйства и очистки уходящих газов. Для студентов энергетических вузов и специальностей, а также инженерно-технических работников электростанций.