

УДК 621.313.333

**А.Т. Ключников, А.А. Левин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Предложена методика расчета температуры обмотки в рабочем режиме двигателя переменного тока. Приведены результаты экспериментальных исследований. Описанный метод позволяет своевременно выявлять предельные температурные режимы работы, снижающие эксплуатационный срок машины.

**Ключевые слова:** двигатель переменного тока, температура обмотки, эксперимент, расчет.

**Kluchnikov A.T., Levin A.A.**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE STATE OF STATOR WINDINGS OF THE AC MOTOR**

The method of windings temperature calculation was proposed for the ac motors. The method enables opportunely reveal the limit for the temperature operating conditions reducing the machine's time exploitation.

**Key words:** ac motor, winding temperature, experiment, calculation.

Показатель эффективности электрических двигателей в период нормальной эксплуатации напрямую зависит от числа его отказов [1]. Одной из причин появления отказов является термическое повреждение изоляции обмоток, вызванное повышением их температуры. Температуру обмоток определяют при испытаниях двигателя на нагрев в соответствии с ГОСТ 11828-66. Испытания на нагрев производят для определения абсолютной температуры и превышения температуры обмотки электродвигателя относительно температуры охлаждающей среды при номинальной нагрузке. Электроизоляционные материалы, применяемые в конструкциях электрических машин, стареют и постепенно теряют электрическую и механическую прочность. Скорость старения изоляции в значительной мере зависит от небольшого превышения номинальной температуры. Связь между сроком службы изоляции и рабочей температурой имеет ло-

гарифмический характер, и если по одной оси откладывать температуру в линейном масштабе, а по другой – срок службы в логарифмическом масштабе, то зависимость представляется прямой [2].

Известно, что одним из свойств металлов является их способность изменять свое электрическое сопротивление с ростом температуры [3]. Изменение величины сопротивления обмоток электрических машин позволяет корректировать коэффициент полезного действия и электромагнитный момент.

В соответствии с ГОСТ 25941-83 регламентирующим методы определения потерь и коэффициента полезного действия, учитываемые потери в цепях рабочих обмоток вычисляются по току и сопротивлению обмоток. Потери от прохождения рабочего тока в обмотках статора зависят от температуры меди – параметра, изменяющегося в процессе эксплуатации [4].

В работе рассматривается способ определения температуры статорной обмотки, вычисленной аналитически, с последующим сравнением со значениями, полученными в результате эксперимента. На основе полученных данных сделан вывод о жизнеспособности представленного метода измерений. Для проведения экспериментальных исследований был использован стенд, включающий в себя: источник питания на основе преобразователя частоты (ПЧ), переключатель фаз двигателя между ПЧ и измерительным мостом сопротивления (МС). Использование моста сопротивлений типа МО-62 обусловлено его точностью, так как погрешность измерений в диапазоне от 0,1 до 105 Ом не превышает 0,1 %.

В результате проведения опыта по измерению температуры обмотки двигателя были получены зависимости сопротивлений от времени, которые представлены на рис. 1. Время прогревания обмотки составило порядка двух часов, что сопровождалось спадающим током в пределах от 10,6 до 9,5 А. Действующее значение напряжения, подводимое к обмотке статора, практически было неизменно.

Экспериментальное сопротивление  $R_{OM}$  является базовым, так как определено с высокой точностью с помощью моста МО62. Расчетное значение сопротивления  $R_{VI}$  можно получить при помощи уравнения электромагнитной мощности, учитывающего потери в меди статора [5]. Однако для обеспечения точности наблюдений за динамикой изменения расчетного сопротивления в зависимости от величины тока было использовано выражение

$$R_{VI} = \frac{U - f \cdot \Delta U}{I} - 0,255, \quad (1)$$

где  $f$  – частота напряжения в эксперименте; 0255 – величина, учитывающая сопротивление проводов от ПЧ до точки измерения мостом МО62;  $\Delta U$  – коэффициент увеличения напряжения на 1 Гц.

Коэффициент увеличения напряжения, учитывает компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении статора (IR-компенсация) [6].

Значения расчетных сопротивлений практически совпадают с измеренными сопротивлениями, приведенными на рис. 1.

Величина абсолютной погрешности [9] расчетного сопротивления вычислена по формуле

$$A_R = R_{VI} - R_{OM}. \quad (2)$$

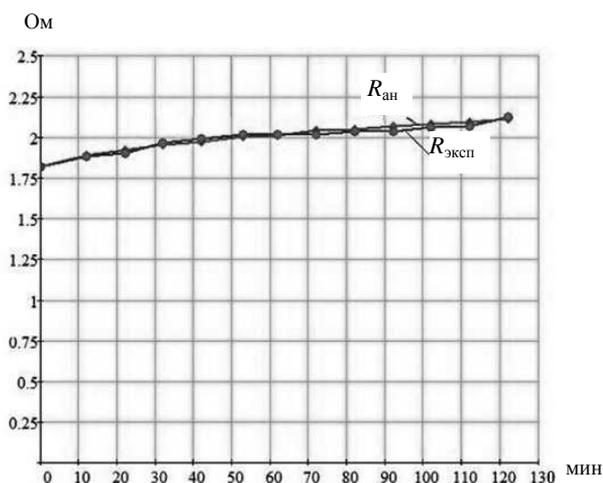


Рис. 1. Изменения значений расчетных и измеренных сопротивлений с течением времени

График изменения абсолютной погрешности с течением времени представлен на рис. 2.

При определении величины приращения температуры обмотки  $\Delta\theta$ , согласно ГОСТ 6651-2009, регламентирующему общие технические требования и методы испытаний сопротивления из меди в диапазоне температур от 0 до 200 °С, целесообразно использовать формулу

$$\Delta\theta = 235 \frac{R_T}{R_O} - 235, \quad (3)$$

где  $R_T$  – нарастающее значение сопротивления в процессе проведения опыта;  $R_O$  – значение сопротивления обмотки при температуре окружающей среды.

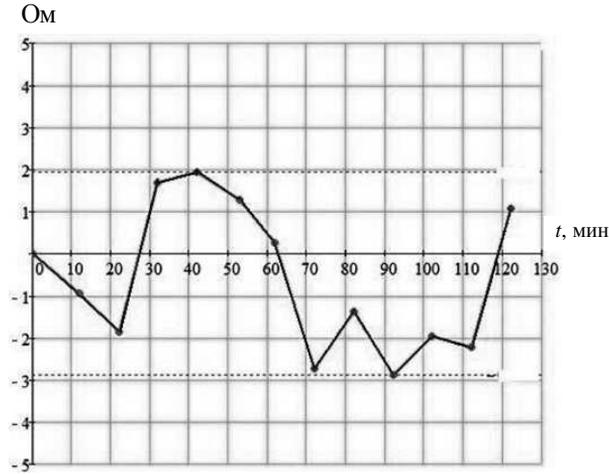


Рис. 2. Изменение значения абсолютной погрешности с течением времени

Тогда, используя выражение (3) для вычисления приращения температуры, получаем графики, представленные на рис. 3.

Для вычисления приращения температуры (аналитически) так же используем выражение (3), присваивая значению  $R_r$  данные, полученные аналитическим путем по (1), а  $R_o$  – значение сопротивления обмотки в нулевой точке времени. График зависимости приращения температуры, полученный при использовании (1),(2),(3), также приведен на рис. 3.

На основе результатов, представленных на рис. 3, найдем величину абсолютной погрешности приращения температуры по формуле

$$A_\theta = \Delta\theta_{VI} - \Delta\theta_{OM} . \quad (4)$$

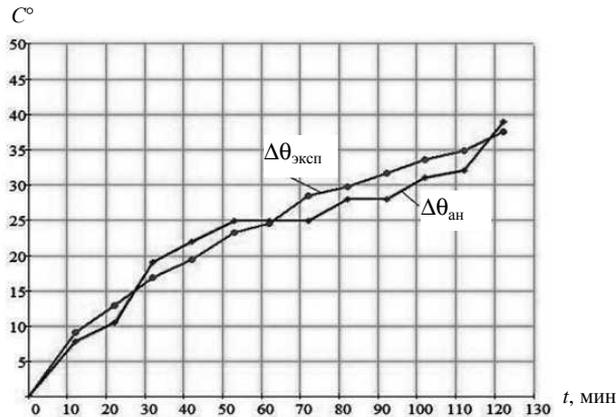


Рис. 3. Изменение приращений температуры с течением времени

График изменения величины абсолютной погрешности прираще-  
ния температуры  $A_\theta$  с течением времени  $t$  представлен на рис. 4.

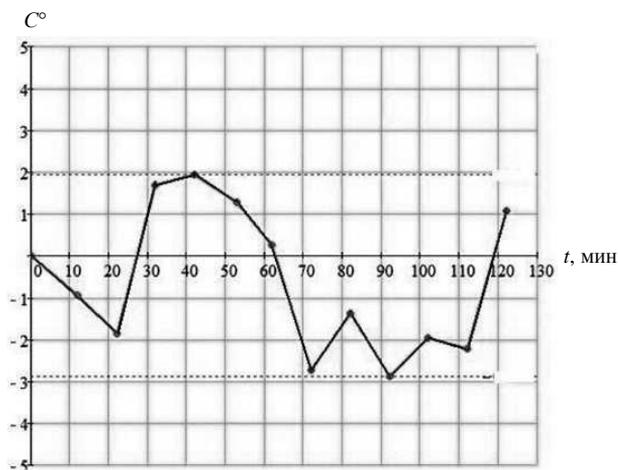


Рис. 4. Изменение значения абсолютной погрешности с течением времени

Анализ результатов, приведенных на рис. 1, показал, что кривые практически совпадают, сохраняя при этом общую тенденцию роста величины сопротивления с течением времени. Изменение величины сопротивления в пределах от 1,8 до 2,1 Ом происходит практически по линейному закону, что соответствует физическим процессам нагрева.

Изучение графика, представленного на рис. 2, показало, что кривая погрешности носит знакопеременный характер и имеет максимальные отклонения при значении  $A_R = 0,0195$  и при значении  $A_R = -0,0288$ , что дает возможность сделать вывод о том, что максимальная величина погрешности измерения сопротивления незначительна.

Исследование графика, представленного на рис. 3, дает возможность утверждать, что форма кривых соответствует начальной части графика экспоненциальной функции.

Анализ графика, представленного на рис. 4, показал, что кривая погрешности имеет знакопеременный характер при максимальных отклонениях порядка 2–3 градуса. Это дает возможность сделать вывод, о том, что величина абсолютной погрешности изменения температуры невелика, а максимальное значение отклонения температуры составляет 9,91 % от величины нагрева обмотки, равной в эксперименте 37 градусов.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- проведенные исследования позволили получить зависимость изменения температуры обмоток двигателя при постоянстве действующих значений напряжения;
- сравнение величин, полученных экспериментальным и аналитическим путем, показало, что максимальное отклонение расчетной величины усредненной температуры обмоток не превышает 10 %;
- описанный метод может быть использован для наблюдения за температурным состоянием обмоток двигателя без отключения двигателя от источника питания, т.е. в рабочем режиме.

### **Библиографический список**

1. Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011.
2. Мартко Е.О. Модели надежности и технического состояния изоляции электродвигателей, используемые для прогнозирования выхода их из строя // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2.
3. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Азбукин Ю.И., Повышение эффективности эксплуатации турбогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Ключников А.Т. Тарировка уравнений асинхронных машин при моделировании в относительных единицах // Электротехника. – 2012. – № 3.
6. Черный А.П., Полищук П.И., Воробейчик О.С. Анализ статических характеристик частотно-регулируемого электропривода с фильтром на выходе инвертора // Вестник КДПУ им. М. Остроградского. Выпуск 1/2007 (42). Часть 2.

### **References**

1. Apollonskii S.M., Kuklev Iu.V. Nadezhnost' i effektivnost' elektricheskikh apparatov [Reliability and efficiency of electrical equipment] Saint Petersburg: Lan', 2011.
2. Martko E.O. Modeli nadezhnosti i tekhnicheskogo sostoianiia izoliatsii elektrodvigatelei, ispol'zuemye dlia prognozirovaniia vykhoda ikh iz

stroia [Model of reliability and technical condition of the insulation of electric motors used to predict their failure]. *Polzunovskii vestnik*, 2013, no. 4-2.

3. Koritskii Iu.V., Pasyukov V.V., Tareev B.M. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam [Handbook of electrical materials]. Leningrad: Energoatomizdat, 1988.

4. Azbukin Iu.I., Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii turbogeneratorov [Improving operational efficiency of turbine generators] Moscow: Energoatomizdat, 1983.

5. Klichnikov A.T. Tarirovka uravnenii asinkhronnykh mashin pri modelirovanii v otnositel'nykh edinit'sakh [Calibration equations for modeling induction machines in relative units]. *Elektrotehnika*. 2012, no. 3.

6. Polishchuk P.I., Vorobeichik O.S. Analiz staticheskikh kharakteristik chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s fil'trom na vykhode invertora [Analysis of static characteristics of variable frequency drive with inverter output filter]. Kremenchugskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet imeni M. Ostrogradskogo.

### **Сведения об авторах**

**Ключников Анатолий Терентьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, тел: +7 (342) 2–198–057).

**Левин Александр Андреевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: levindom@mail.ru).

### **About the authors**

**Kluchnikov Anatoly Terentyevich** (Perm, Russian Federation) – is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., тел: +7 (342) 2–198–057).

**Levin Alexander Andreevich** Perm, Russian Federation) – is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: levindom@mail.ru).

Получено 12.09.2014