

УДК 621.313.333

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****Е.О. Лавренов, З.С. Темлякова, А.А. Темляков***Новосибирский государственный технический университет*

Работа посвящена оценке уровня влияния межвиткового короткого замыкания в одной из фаз ротора на качество работы асинхронного двигателя. В качестве объекта исследования выступает асинхронный двигатель с фазным ротором, широко применяемый в качестве привода механизмов в цементной промышленности, отличающейся тяжелыми условиями эксплуатации. В связи со спецификой режима межвиткового короткого замыкания применение стандартной методики расчета характеристик двигателя в этом случае оказывается невозможным. В качестве решения задачи представлена модификация классической математической модели асинхронного двигателя для расчета токов и момента двигателя в условиях несимметрии роторной цепи. С использованием программного пакета MatLab выполнено численное моделирование подобного режима для двигателя АКЗ 13–62–8УХЛ4. Представлены зависимости токов фаз обмоток статора и ротора, угловой частоты вращения ротора от времени, а также статическая и механическая характеристики машины в режиме межвиткового короткого замыкания в одной из фаз ротора. Выделены характерные особенности воздействия данного режима на отдельные характеристики, а также работу машины в целом. На основе анализа полученных результатов выделены критерии, позволяющие сделать вывод о целесообразности продолжения эксплуатации поврежденного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, межвитковое короткое замыкание, математическое моделирование, электрическая несимметрия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-62-72

Введение

В цементном производстве в качестве элемента электропривода тарельчатых питателей сырьевых мельниц, клинкерных транспортеров, шламовых насосов, печей обжига используются высоковольтные асинхронные двигатели как с фазным, так и с короткозамкнутым ротором.

Причины возникновения неисправностей асинхронных двигателей имеют различную природу. Одной из наиболее распространенных причин аварий в подобных производствах является работа двигателя в условиях высокого загрязнения. Кроме того, аварии являются результатом несовершенства технологических процессов производства, несоблюдения условий эксплуатации.

Согласно статистике, капитальному ремонту подвергается приблизительно 20 % электродвигателей, в остальных случаях неисправности возникают на более ранних сроках эксплуатации. В 70–80 % случаях выхода из строя асинхронных двигателей причиной является повреждение обмоток. В свою очередь, выход из строя обмоток в 93 % случаях обусловлен межвитковым замыканием [1]. Возникающие дефекты становятся причиной возникновения различного рода несимметрий в электрических и магнитных цепях электродвигателей.

При этом межвитковые короткие замыкания являются одними из наиболее трудно выявляемых повреждений. Наиболее эффективные методы (анализ спектра модулей векторов Парка, анализ магнитного потока, измерение частичных разрядов, сигнатурный анализ электрических сигналов электродвигателя и др.)

основаны на выявлении характерных частотных составляющих сигнала, свидетельствующих о наличии данного вида неисправности. Однако на практике источником таких частотных составляющих может выступать небольшой дисбаланс питающего напряжения, который неизбежен при эксплуатации, либо изменения в приводимом механизме [2, 3]. Поэтому по данному критерию довольно трудно различить межвитковое короткое замыкание и, например, несимметрию питающего напряжения.

Целью работы является оценка влияния межвиткового короткого замыкания на величины токов обмоток и электромагнитного момента асинхронного двигателя.

1. Математическое моделирование

Ниже представлены результаты вывода системы дифференциальных уравнений для исследования межвитковых коротких замыканий в одной из фаз ротора (в данном случае в фазе A).

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы машины, построена на базе классического математического описания асинхронного двигателя в трехфазной естественной системе координат [4]. Для достижения сформулированной цели работы получена модификация математической модели, учитывающая особенности исследуемых режимов. В результате описание системы уравнений обеспечивает дополнительную возможность учета несимметрии обмоток, в качестве отличительного свойства модификации полученная система имеет дополнительное уравнение для короткозамкнутого контура обмотки фазы A ротора и учитывает долю короткозамкнутых витков поврежденной фазы [5].

Модифицированная система дифференциальных уравнений статора имеет вид

$$\begin{cases} u_A - i_A R_A - \frac{d\Psi_A}{dt} - u_B + i_B R_A + \frac{d\Psi_B}{dt} = 0, \\ u_B - i_B R_B - \frac{d\Psi_B}{dt} - u_C + i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt} = 0, \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Модифицированная система уравнений ротора запишется в виде

$$\begin{cases} -i_a v_o R_a - \frac{d\Psi_a}{dt} + i_b R_b + \frac{d\Psi_b}{dt} = 0, \\ -i_b R_b - \frac{d\Psi_b}{dt} + i_c R_c + \frac{d\Psi_c}{dt} = 0, \\ i_a + i_b + i_c = 0, \\ i_k R_k + \frac{d\Psi_a}{dt} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $R_k = R_a v_k$ – активное сопротивление короткозамкнутого контура.

При этом выражения потокосцеплений фаз статора и ротора имеют вид:

$$\begin{aligned} \Psi_A = & (L_{1\sigma} + L_m) i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_m v_o i_a \cos(\varphi + 0) + \\ & + L_m v_k i_k \cos(\varphi + 0) + L_m i_b \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_c \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_B = & (L_{1\sigma} + L_m)i_B - \frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_C + L_m i_b \cos(\varphi + 0) + \\ & + L_m i_c \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m v_o i_a \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + L_m v_k i_k \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_C = & (L_{1\sigma} + L_m)i_C - \frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_B + L_m i_c \cos(\varphi + 0) + \\ & + L_m v_o i_a \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m v_k i_k \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_b \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a = & (L_{2\sigma} + L_m)v_o^2 i_a + L_m v_o v_k i_k - \frac{1}{2}L_m v_o i_b - \frac{1}{2}L_m v_o i_c + \\ & + L_m v_o i_A \cos(-\varphi + 0) + L_m v_o i_B \cos\left(-\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m v_o i_C \cos\left(-\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Psi_b = & (L_{2\sigma} + L_m)i_b - \frac{1}{2}L_m v_o i_a - \frac{1}{2}L_m v_k i_k - \frac{1}{2}L_m i_c + \\ & + L_m i_B \cos(-\varphi + 0) + L_m i_C \cos\left(-\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_A \cos\left(-\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_c = & (L_{2\sigma} + L_m)i_c - \frac{1}{2}L_m v_o i_a - \frac{1}{2}L_m v_k i_k - \frac{1}{2}L_m i_b + \\ & + L_m i_C \cos(-\varphi + 0) + L_m i_A \cos\left(-\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_B \cos\left(-\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где L_m – эквивалентная взаимная индуктивность; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки ротора; i_A, i_B, i_C – токи статора в фазах A, B и C соответственно; i_a, i_b, i_c – токи ротора в фазах A, B и C соответственно; v_k – отношение количества витков короткозамкнутого контура к общему количеству витков фазы ротора; v_o – отношение оставшихся «уцелевших» витков к общему количеству витков фазы ротора; φ – угол положения обмотки фазы ротора и соответствующей одноименной обмотки фазы статора.

В результате совместного решения уравнений (3)–(8) и (1), (2) получены уравнения, на основании которых рассчитываются величины токов и электромагнитного момента асинхронного двигателя при межвитковом коротком замыкании. Итоговая запись данных уравнений выглядит следующим образом.

Фаза A статора

$$\begin{aligned} & -\left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_A}{dt} + \left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_B}{dt} + \\ & + L_m\left(-v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) - \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right)\frac{di_a}{dt} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +L_m \left(-v_k \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right) \frac{di_k}{dt} + L_m \left(3 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) \right) \frac{di_b}{dt} + \\
& + L_m i_a \omega_r \left(v_o \sqrt{3} \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) + \sqrt{3} \cos(\varphi) \right) + \\
& + L_m v_k i_k \omega_r \left(\sqrt{3} \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) \right) + L_m i_b \omega_r \left(3 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right) + \\
& + (U_A \sin(\omega t - \alpha_a) - U_B \sin(\omega t - \alpha_b)) - i_A R_A + i_B R_B = 0.
\end{aligned}$$

Фаза *B* статора

$$\begin{aligned}
& -2 \left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2} L_m \right) \frac{di_B}{dt} - \left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2} L_m \right) \frac{di_A}{dt} + \\
& + L_m \left(v_o \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) - \sqrt{3} \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) \right) \frac{di_a}{dt} + \\
& + L_m \left(v_k \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \frac{di_k}{dt} + L_m (-3 \cos(\varphi)) \frac{di_b}{dt} + \\
& + L_m i_a \omega_r \left(v_o \sqrt{3} \cos(\varphi - \pi) + \sqrt{3} \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\
& + L_m v_k i_k \omega_r \left(\sqrt{3} \cos(\varphi - \pi) \right) + L_m i_b \omega_r \left(3 \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \right) + \\
& (U_B \sin(\omega t - \alpha_b) - U_C \sin(\omega t - \alpha_c)) - i_A R_C - i_B (R_B + R_C) = 0.
\end{aligned}$$

Фаза *A* ротора

$$\begin{aligned}
& - \left((L_{2\sigma} + L_m) v_o^2 + L_m v_o - \frac{1}{2} L_m \right) \frac{di_a}{dt} - \left(L_m v_o v_k + \frac{1}{2} L_m v_k \right) \frac{di_k}{dt} + \\
& + \left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2} L_m \right) \frac{di_b}{dt} + L_m \left(v_o \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{5\pi}{6} \right) + \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \frac{di_A}{dt} + \\
& + L_m \left(v_o \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right) \frac{di_B}{dt} + \\
& + L_m i_A \omega_r \left(v_o \sqrt{3} \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) - \sqrt{3} \cos(\varphi) \right) + \\
& + L_m i_B \omega_r \left(-v_o \sqrt{3} \cos(\varphi) + \sqrt{3} \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \right) - i_a v_o R_a + i_{rb} R_b = 0.
\end{aligned}$$

Фаза В ротора

$$\begin{aligned}
 & -2\left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_b}{dt} - \left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_a}{dt} + L_m(-3\cos(\varphi))\frac{di_B}{dt} + \\
 & + L_m\left(3\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\right)\frac{di_A}{dt} + L_m i_A \omega_r \left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)\right) + \\
 & + L_m i_B \omega_r \left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right) - i_a R_c - i_b (R_b + R_c) = 0.
 \end{aligned}$$

Короткозамкнутый контур фазы А ротора

$$\begin{aligned}
 & v_k^2 (L_{2\sigma} + L_m) \frac{di_k}{dt} + \left(L_m v_o v_k + \frac{1}{2} L_m v_k\right) \frac{di_a}{dt} + \\
 & + L_m v_k \sqrt{3} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \frac{di_A}{dt} + L_m v_k \sqrt{3} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \frac{di_B}{dt} + \\
 & + L_m v_k i_A \omega_r \left(\sqrt{3} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right)\right) + L_m v_k i_B \omega_r \left(\sqrt{3} \cos(\varphi)\right) + i_k R_k = 0.
 \end{aligned}$$

Анализ полученных выражений позволяет констатировать отличительные признаки полученной математической модели: в уравнениях имеются составляющие, отражающие влияние тока дополнительного контура, образованного короткозамкнутыми витками, на токи фаз обмоток статора и ротора.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется как частная производная по геометрическому углу от общего запаса электромагнитной энергии машины. Электромагнитная энергия обмоток асинхронной машины определяется по соотношению:

$$W_{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot [\Psi_A \cdot i_A + \Psi_B \cdot i_B + \Psi_C \cdot i_C + \Psi_a \cdot i_a + \Psi_b \cdot i_b + \Psi_c \cdot i_c].$$

Отсюда электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \gamma} Z_p,$$

где Z_p – число пар полюсов двигателя.

Уравнение движения записывается в виде

$$M - M_C = J \frac{d\omega_r}{dt},$$

где M_C – момент сопротивления; J – суммарный момент инерции электропривода; ω_r – угловая частота вращения ротора.

2. Численное моделирование режима межвиткового короткого замыкания в роторе

В качестве объекта исследования выступает высоковольтный асинхронный электродвигатель с фазным ротором типа АКЗ 13-62-8УХЛ4 мощностью 630 кВт с синхронной частотой вращения 750 об/мин. Электродвигатели данного типа используются в цементной промышленности в качестве электропривода печей обжига клинкера.

В среде программного пакета MatLab реализовано моделирование режима пуска двигателя при наличии межвиткового короткого замыкания в одной из фаз ротора [6, 7]. В работе данный режим характеризуется зависимостями токов фаз обмоток статора и ротора, частоты вращения ротора в функции времени, механической характеристикой асинхронного двигателя.

На рис. 1, 2 приведены зависимости токов фаз статора и ротора в функции времени, на рис. 3 – зависимость частоты вращения от времени, на рис. 4 – механическая характеристика машины для случая 60 % витков фазы в короткозамкнутом контуре фазы A ротора ($v_k = 0,6$) при номинальной механической нагрузке.

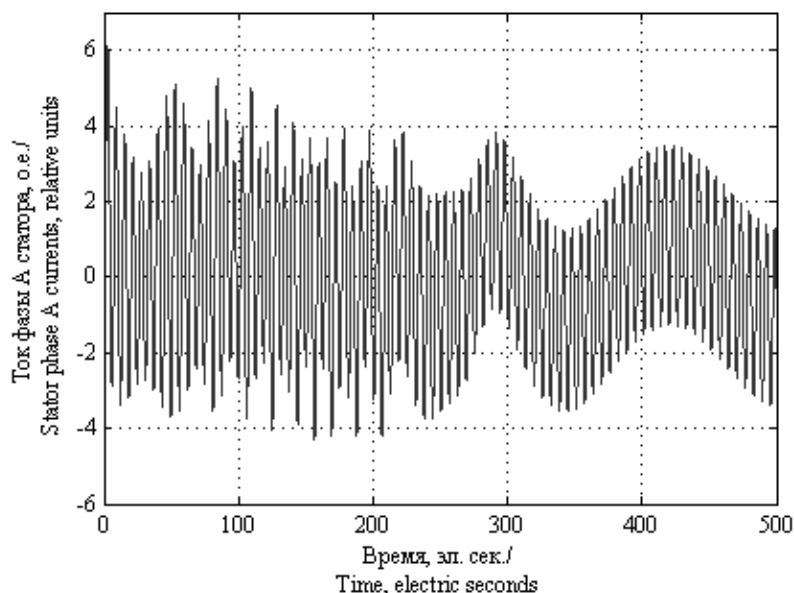


Рис. 1 – Ток фазы A статора при межвитковом коротком замыкании в одной фазе ротора при $v_k = 0,6$

Fig. 1 – Stator current of phase A at turn-to-turn short circuit in one rotor phase with $v_k = 0,6$

3. Анализ результатов моделирования режима межвиткового короткого замыкания

Как показывает анализ зависимости частоты вращения ротора в функции времени (рис. 3), увеличение частоты вращения вала ротора в диапазоне от 0 до 0,5 синхронной происходит за промежуток времени 280 электрических секунд. Следует отметить, что для моделируемого режима в последующий момент времени имеет место резкий провал механического момента, обусловленный эффектом Гергеса, который возникает в результате несимметрии в цепи ротора.

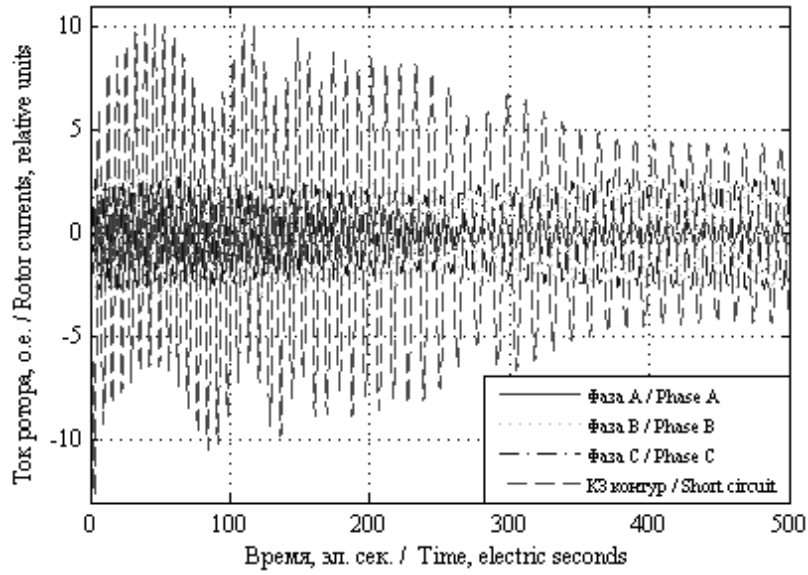


Рис. 2 – Токи фаз ротора при межвитковом коротком замыкании в одной фазе ротора при $v_k = 0,6$

Fig. 2 – Rotor current of phase A at turn-to-turn short circuit in one rotor phase with $v_k = 0,6$

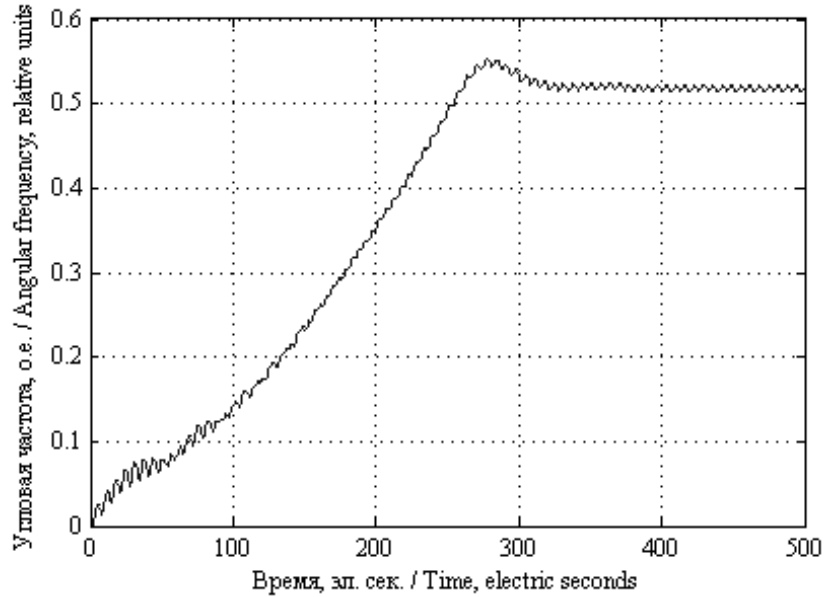


Рис. 3 – Частота вращения ротора при межвитковом коротком замыкании в одной фазе ротора при $v_k = 0,6$

Fig. 3 – Rotor rotational speed at turn-to-turn short circuit in one rotor phase with $v_k = 0,6$

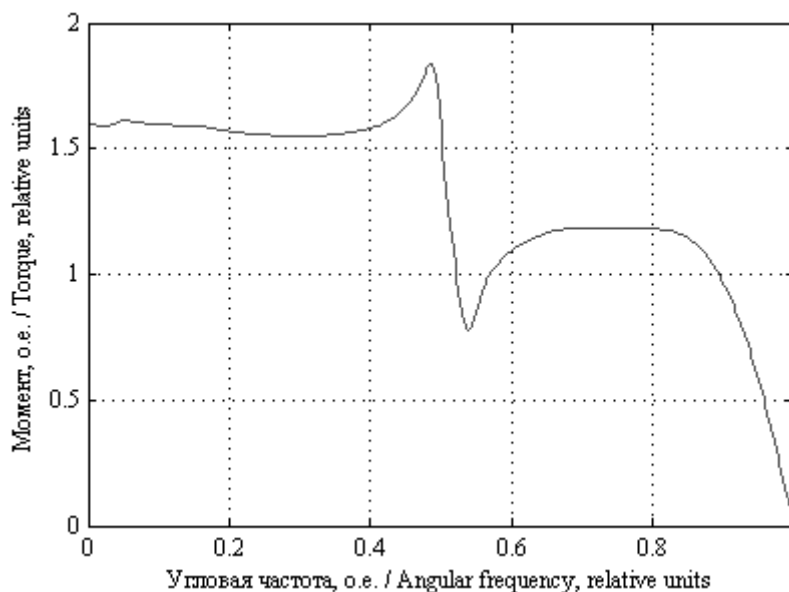


Рис. 4 – Статическая механическая характеристика двигателя при межвитковом коротком замыкании в одной фазе ротора с $\nu_k = 0,6$
 Fig. 4 – Motor static mechanical characteristic at turn-to-turn short circuit in one rotor phase with $\nu_k = 0,6$

Анализ зависимостей токов фаз ротора в функции времени, приведенных на рис. 2, в свою очередь, показывает, что ток короткозамкнутого контура примерно на порядок превосходит значения токов в уцелевших частях обмоток ротора. Это обстоятельство предопределяет превышение токов фаз ротора выше допустимых значений. Так как электрические потери в обмотке пропорциональны квадрату тока, то значение мощности потерь в меди короткозамкнутого контура будет примерно в 100 раз превосходить номинальные расчетные значения, что неминуемо приведет к недопустимому перегреву электрической машины и развитию аварийной ситуации.

Анализ зависимостей токов фаз обмоток статора двигателя, показанных на рис. 1, позволяет констатировать модулирующий эффект тока короткозамкнутого контура, представленного на рис. 2. Амплитуды токов также имеют повышенные значения по сравнению с номинальной величиной, что является недопустимым и говорит о необходимости немедленного отключения аварийного двигателя.

Исследования показали, что вид характеристик, по которым делается вывод о степени аварийности состояния обмотки, в частности амплитуды токов фаз обмоток двигателя и величина провала в механической характеристике, в значительной степени зависит от значения параметра ν_k , который учитывает отношение короткозамкнутых витков к общему количеству витков фазы обмотки.

С целью верификации модификации математической модели сформирован массив расчетных данных высоковольтных асинхронных двигателей типа АКЗ 13-62-8УХЛ4 в диапазоне мощностей 630...2000 кВт.

Систематизация результатов расчета асинхронных двигателей в указанном диапазоне мощности показывает, что при доле короткозамкнутых витков $\geq 0,6$ величина провала момента при частоте вращения близкой к 0,5 синхронной достигает величины, меньшей уровня номинальной нагрузки.

Двигатель при этом теряет способность осуществлять заданные функции по причине того, что на данном отрезке времени момент нагрузки оказывается больше электромагнитного момента асинхронного двигателя. Это прерывает монотонность увеличения частоты вращения вала ротора, которая при указанных обстоятельствах является ограниченной величиной, близкой к половине синхронной частоты вращения.

Заключение

Для решения задачи оценки влияния межвиткового короткого замыкания на значения токов обмоток и электромагнитного момента асинхронного двигателя разработана модификация базовой математической модели асинхронного двигателя.

Для асинхронных двигателей типа АКЗ 13-62-8УХЛ4 в диапазоне мощностей 630...2000 кВт получен массив расчетных данных токов фаз обмоток и электромагнитных моментов.

Получены следующие основные результаты для указанного диапазона мощности асинхронных двигателей:

– величина провала механического момента двигателя при частоте вращения близкой к половине синхронной достигает значения, меньшего уровня номинальной нагрузки при доле короткозамкнутых витков $\geq 0,6$;

– сопровождающее режим резкое возрастание токов фаз неминуемо приведет к недопустимому перегреву электрической машины и развитию аварийной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов И.П., Клоков Б.К.** Справочник по электрическим машинам. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
2. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Иванов. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
3. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 34–39.
4. ГОСТ ISO 20958–2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – Введ. 2016–11–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
5. **Лавренов Е.О., Тюков В.А.** Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 7–12.
6. Finite element code for multidimensional numerical analysis of squirrel-cage induction motor / M.G. Persova, Yu.G. Soloveichik, N.V. Kondratyev, Z.S. Temlyakova, A.A. Temlyakov // Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017): proceedings of the International conference, Tomsk, 27–29 July 2017. – Paris: Atlantis Press, 2017. – P. 847–853.
7. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, В.В. Гречкин, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 33–35.

ESTIMATION OF THE TURN-TO-TURN SHORT CIRCUIT EFFECT ON THE INDUCTION MOTOR OPERATION QUALITY

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S., Temlyakov A.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper is devoted to the evaluation of the influence level of turn-to-turn short circuit in one of rotor phases on induction motor operation quality. The object of research is an induction motor with a phase rotor widely used as a drive mechanism in the cement industry characterized by

severe operating conditions. Because of the turn-to-turn short circuit mode specificity, application of a standard method for calculating motor characteristics is impossible in this case. A modification of the classic mathematical model for calculating currents and torques under rotor circuit unbalanced condition is presented as a solution of the problem. As a result of numerical simulation, the dependences of phase currents of the stator and rotor windings, the angular frequency of the rotor, as well as static mechanical characteristics of the machine in the turn-to-turn short circuit mode in one of the rotor phases are shown. Based on the results obtained, criteria are pointed out that make it possible to conclude that it is advisable to continue the damaged motor operation. As future research, it is possible to create a real-time diagnostic system based on the developed algorithm for calculating symmetric modes of an induction motor.

Keywords: induction motor, turn-to-turn short circuit, mathematical simulation, electrical unbalanced condition.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-62-72

REFERENCES

1. Kopylov I.P., Klokov B.K. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 456 p.
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector equation of an AC drive]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2008. 298 p.
3. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostika neispravnosti asinkhronnykh dvigatelei na osnove spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of induction motors based on spectral analysis of stator currents]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie – Energy Safety and Energy Economy*, 2014, no. 3, pp. 34–39.
4. GOST ISO 20958–2015. *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Signaturnyi analiz elektricheskikh signalov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya* [State Standard ISO 20958–2015. Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 28 p.
5. Lavrenov E.O., Tyukov V.A. Chislennoe modelirovanie nesimmetrii statora i rotora asinkhronnogo dvigatelya [Stator and rotor asymmetry modeling of an induction motor]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 1, pp. 7–12. (In Russian).
6. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Kondratyev N.V., Temlyakova Z.S., Temlyakov A.A. *Finite element code for multidimensional numerical analysis of squirrel-cage induction motor*. Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2017), Tomsk, 27–29 July 2017, pp. 847–853.
7. Temlyakova Z.S., Grechkin V.V., Soloveichik Yu.G., Persova M.G. Komp'yuternaya podderzhka proektirovaniya vysokovol'tnykh asinkhronnykh dvigatelei [Computer support for the design of high-voltage asynchronous motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, 12, pp. 33–35.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Лавренов Евгений Олегович – получил степень бакалавра и магистра техники и технологии в Новосибирском государственном техническом университете в 2011 и 2013 гг. соответственно. В настоящее время является аспирантом кафедры электромеханики. Область научных интересов: математическое моделирование режимов работы асинхронных двигателей, диагностика неисправностей. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru).

Lavrenov Evgeniy Olegovich – received B.S. and M.S. degrees from Novosibirsk state technical university in 2011 and 2013, respectively. He is currently a postgraduate student of Electromechanics department of Novosibirsk state technical university. His research interests are in the area of induction motor operation, fault diagnostic and detection using mathematical modeling. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru).



Темлякова Зоя Савельевна – профессор кафедры электромеханики, д-р техн. наук, профессор. Окончила НГТУ (НЭТИ) в 1971 году, инженер электромеханик. Докторскую диссертацию «Развитие теории и методов электромагнитных расчетов управляемых асинхронных машин» защитила в 2000 году. Ученое звание профессора по кафедре электромеханики присвоено в 2003 году. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: temlyakova@corp.nstu.ru).

Temlyakova Zoya Savelevna – Doctor of Sciences (Eng.), professor of Electromechanic department of Novosibirsk state technical university since 2003. She graduated NSTU in 1971. In 2000 she defend doctoral dissertation with subject “Development of the theory and methods of electromagnetic calculations of controlled asynchronous machines”. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: temlyakova@corp.nstu.ru).



Темляков Антон Александрович – студент факультета мехатроники и автоматизации. Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: maksidor@inbox.ru)

Temlyakov Anton Aleksandrovich – student of Mechatronic and automation faculty NSTU. Field of education is power systems engineering. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maksidor@inbox.ru).

Статья поступила 02 декабря 2018 г.

Received December 02, 2018

To references:

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S. Temlyakov A.A. Otsenka vliyaniya mezhvitkovogo korotkogo замыкания на качество работы асинхронного двигателя [Estimation of turn-to-turn short circuit effect on the induction motor operation quality]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 1 (42), pp. 62–72. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-62-72.