

## К ВОПРОСУ О ПРИНЦИПАХ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Темертей Н.В., студент; Балабанов Е.Ю, студент; Шелехова О.Г. доц., к.т.н.**  
(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк)

В процессе разработки систем автоматизации асинхронного электропривода возникает необходимость организации тщательного контроля за всеми переменными электропривода, и, в случае возникновения аварийных ситуаций требуется вовремя остановить электропривод для исключения возможных перегрузок и более тяжелых последствий [1]. Опыт эксплуатации свидетельствует [1], что современные устройства защиты в ряде случаев в ряде случаев не позволяют защитить электродвигатель от тепловых перегрузок при нарушении симметрии питающего напряжения. В результате [2, 3] до 45% отказов электродвигателей при несимметрии источника питания происходит из-за неэффективности аппаратуры защиты.

В качестве параметров несимметрии напряжения сети принято использовать [4]: коэффициент несимметрии обратной последовательности ( $K_{2U}$ ), напряжение прямой последовательности ( $U_{пр}$ ) и сдвиг по фазе между симметричными составляющими напряжения прямой и обратной последовательности:  $\Delta\psi = \psi_{пр} - \psi_{обр}$ .

**Целью данной работы** была оценка теплового состояния АД при различных параметрах несимметрии питающего напряжения ( $U_{пр}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ). Разработка, на основании проведенных исследований, рекомендаций по учету несимметрии питающего напряжения в устройствах защиты АД от тепловых перегрузок.

Расчет токов осуществлялся методом симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения [5]. Оценка теплового состояния АД выполнялась с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных на основании эквивалентной тепловой схемы (ЭТС). Для этого использовалась ЭТС (рис. 1), разработанная проф. Федоровым М.М., которая позволяет учесть неравномерный нагрев электродвигателя при различных параметрах несимметрии источника питания [5]. Ее особенностью является тот факт, что в виде отдельных узлов выделены элементы конструкции каждой фазной обмотки статора. Это связано с тем, что мощность источников тепла в обмотках статора при несимметрии может иметь существенные отличия. Лобовые части обмоток статора АД мощностью свыше 15 кВт перекрываются [5]. Тепловые потоки между лобовыми частями различных фазных обмоток статора подобных АД учитывались с помощью тепловых сопротивлений  $R_{4-5}$ ,  $R_{5-6}$ ,  $R_{4-6}$  (рис. 1) [5].

Система алгебраических уравнений в матричной форме, полученная с помощью ЭТС, для расчета температур в установившемся состоянии, имеет вид [5]:

$$\Lambda\theta = P, \quad (1)$$

здесь  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_8)^T$  – вектор-столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды  $\theta_0$ ;  $\Lambda = (\lambda_{ij})$  – матрица тепловых проводимостей ЭТС АД;  $P = (P_1, \dots, P_8)^T$  – вектор потерь мощности в узлах АД [5].

В зависимости от контролируемого параметра устройства защиты (УЗ) электродвигателей от асимметрии питающего напряжения можно разбить на [2]: УЗ по напряжению; УЗ по току; УЗ по температуре.

Были проанализированы причины возможных отказов УЗ при несимметричном напряжении сети.

Наибольшее распространение получили устройства защиты, реагирующие на превышение величины тока в цепи питания асинхронного двигателя выше номинального значения [3].

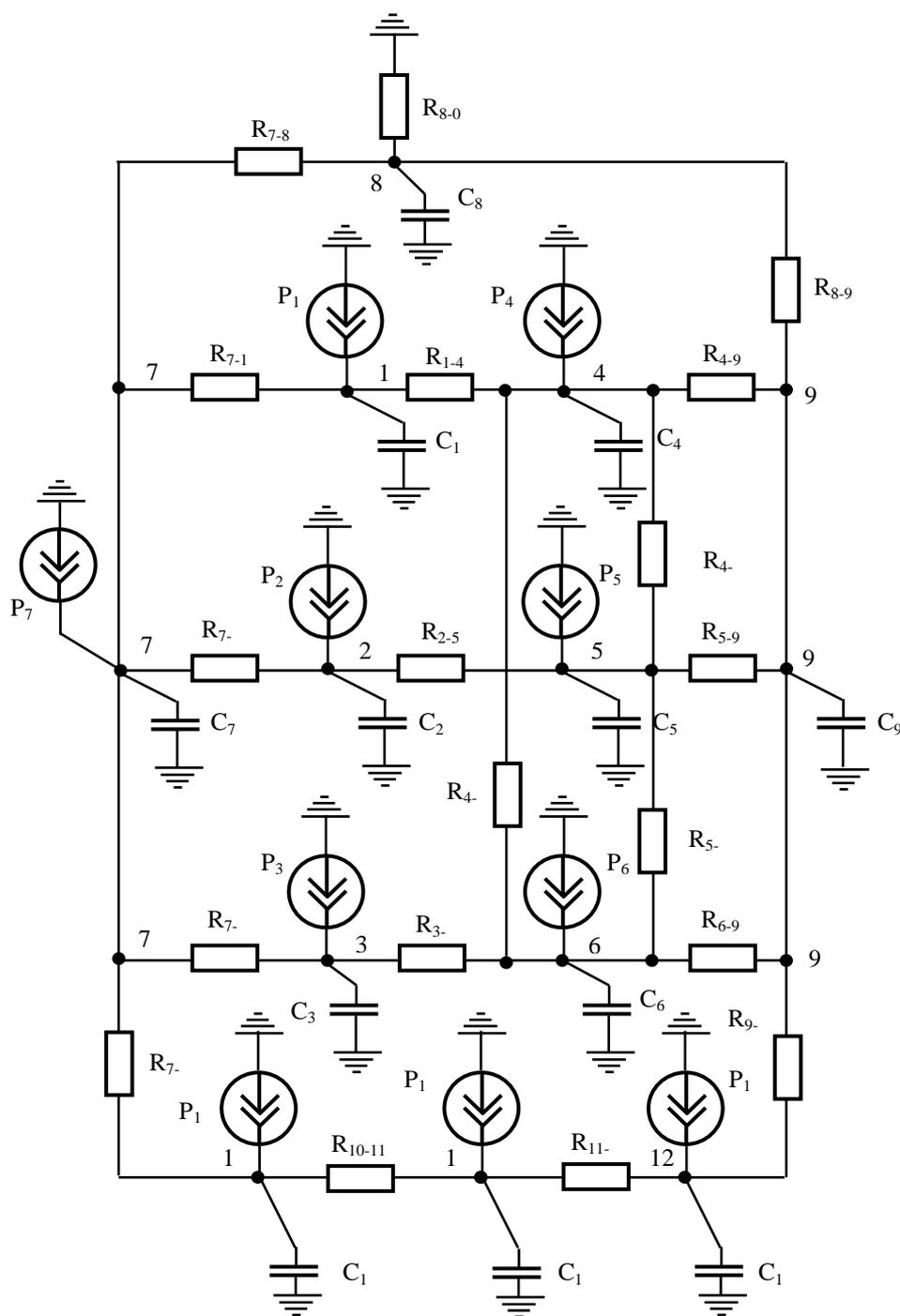


Рисунок 1 – Эквивалентная тепловая схема АД с фазным ротором

В качестве примера в табл. 1 представлены температуры наиболее нагруженной фазы статора и ротора АД МТН 111-6 при условии, что ток наиболее нагруженной фазы статора ( $I_{\text{наиб}}$ ) равен номинальному ( $I_n$ )  $I_{\text{наиб}} = I_n$ , при различных значениях  $U_{\text{пр}}$  и  $K_{2U}$ .

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, следует, что при несимметрии напряжения сети 2% снижение полезной мощности электродвигателя составляет 12%, при этом температуры статора и ротора не превышают  $94^\circ\text{C}$ ,  $101^\circ\text{C}$ . При  $K_{2U} = 4\%$  полезную мощность АД необходимо снизить на 27%, а значения температур не превышают  $77^\circ\text{C}$ ,  $85^\circ\text{C}$ , при  $K_{2U} = 7\%$  – до  $50^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  и т. д.

Таблица 1 - Значения превышения температуры узлов АД МТН 111-6 при условии, что  $I_{\text{наиб}} = I_n$  при различных значениях  $U_{\text{пр}}$  и  $K_{2U}$ .

$U_{\text{пр}}$		Превышения температуры узлов АД $\theta / \theta^*$				
		$K_{2U} = 0\%$	$K_{2U} = 2\%$	$K_{2U} = 4\%$	$K_{2U} = 7\%$	$K_{2U} = 10\%$
$U_n$	$\beta$	1.00	0.88	0.77	0.59	-
	Статор (расчет)	110.0/1.00	101.0/0.92	84.5/ 0.77	59.8/ 0.55	-
	Статор (экспер)	110.0/1.00	101.0/0.92	84.5/ 0.77	59.8/ 0.55	-
	Ротор (расчет)	116.5/1.00	94.0/ 0.84	76.7/ 0.70	49.7/ 0.46	-
$0.9U_n$	$\beta$	0.95	0.88	0.77	0.59	-
	Статор (расчет)	118.0/1.04	104.0/0.94	88.5/ 0.79	64.8/ 0.57	-
	Статор (экспер.)	118.0/1.04	104.0/0.94	88.5/ 0.79	64.8/ 0.57	-
	Ротор (расчет)	119.0/1.05	96.0/ 0.85	78.7/ 0.72	52.7/ 0.48	-

Следовательно, при  $I_{\text{наиб}} = I_n$  асинхронный двигатель недоиспользован по нагреву и имеет низкие энергетические показатели. Вместе с тем, при снижении напряжения прямой последовательности ниже номинального значения, перегрев обмоток статора наблюдается (см. табл. 1) даже при симметричном напряжении сети [3]. Таким образом, контроль тока в цепи питания АД не позволяет осуществить полноценную защиту электродвигателя от перегрузок при несимметрии источника питания.

Современные устройства тепловых защит обладают неоспоримыми преимуществами, связанными с непосредственным измерением температуры обмоток статора. Однако в случае, когда асимметрия сети сопровождается снижением напряжения прямой последовательности ниже номинального, перегрев обмоток ротора может иметь место (см. табл. 2), даже при температуре наиболее нагруженной фазы статора, не превышающем допустимого значения.

Таблица 2 - Значения превышения температуры узлов АД МТН 111-6 при условии, что  $\theta_{\text{наиб}} = \theta_n$  при различных значениях  $U_{\text{пр}}$  и  $K_{2U}$ .

$U_{\text{пр}}$	Узлы	Превышения температуры узлов АД $\theta / \theta^*$				
		$K_{2U} = 0\%$	$K_{2U} = 2\%$	$K_{2U} = 4\%$	$K_{2U} = 7\%$	$K_{2U} = 10\%$
$U_n$	$\beta$	1.00	0.98	0.96	0.94	0.88
	Статор	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00
	Ротор	116.5/1.05	114.1/1.05	112.3/1.05	109.7/1.00	101.2/0.92
$0.9U_n$	$\beta$	0.97	0.97	0.95	0.90	0.87
	Статор	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00	110.0/1.00
	Ротор	121.5/1.11	118.0/1.07	115.5/1.05	107.5/0.98	99.5/0.91

Такой рост температуры, не может быть зафиксирован современными устройствами тепловой защиты, основанными на непосредственном измерении температуры. Поэтому предполагаемая система защиты должна быть построена на косвенной оценке теплового состояния АД. При глубокой несимметрии питающего напряжения время допустимой эксплуатации АД существенно сокращается [4], поэтому необходимо предусмотреть отключение электродвигателя, не дожидаясь сигнала о перегреве его обмоток. В настоящее

время известно и широко применяется ряд устройств, реагирующих на появление составляющих тока (или напряжения) обратной последовательности в обмотках статора [3].

В ходе проведенных в работе исследований установлено, что при постоянном значении коэффициента несимметрии тепловые перегрузки при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$  и  $\Delta\psi = \Delta\psi_{\min}$  могут существенно различаться [4]. Общим недостатком УЗ [3], работающих на принципе контроля симметричных составляющих прямой и обратной последовательности является отсутствие учета влияния фазового сдвига.

Суммируя выше изложенное, система защиты при несимметричном питающем напряжении должна быть построена на принципе косвенной оценки теплового состояния АД. При глубокой несимметрии напряжения сети время допустимой эксплуатации АД существенно сокращается, поэтому в устройстве защиты необходимо предусмотреть узел несимметрии, построенный на основе контроля не только величин симметричных составляющих, но и сдвига по фазе между ними, который будет осуществлять отключение АД, не дожидаясь сигнала о перегреве его обмоток.

По результатам исследований установлено:

1. Современные устройства защиты, реагирующие на изменение одного из параметров напряжения ( $U_{\text{пр}}$ ,  $U_{\text{обр}}$ ,  $\Delta\psi$ ), не позволяют защитить электродвигатель от перегрузок при их одновременном изменении.

2. При использовании устройств контроля теплового состояния АД, основанных на контроле тока в цепи статора, при наиболее неблагоприятном значении угле сдвига между напряжениями прямой и обратной последовательности, электродвигатель недоиспользован по нагреву.

3. Недостатком известных устройств защиты, работающих на принципе контроля несимметрии токов в обмотках статора, является отсутствие учета влияния сдвига по фазе между симметричными составляющими прямой и обратной последовательности.

4. Система защиты при несимметричном питающем напряжении должна быть построена на принципе косвенной оценки теплового состояния АД.

5. При несимметричном напряжении сети контроль температур необходимо осуществлять в трех фазах статора.

6. Для контроля теплового состояния АД с фазным ротором необходимо осуществлять контроль температур не только статора, но и ротора.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем контроля температурного состояния и тепловой защиты асинхронных двигателей, а также системы автоматизированных испытаний и прогнозирования теплового состояния АД.

#### Перечень ссылок

1. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения // Вісник КДПУ - Випуск 3/2009 (56). – Ч.1. – С. 74 – 78

2. Данилов В.Н. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 6. – С. 34 – 37.

3. Черный А.П., Калинов А.П., Мамчур Д.Г. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: IV международн. науч.-техн. конф. Днепродзержинск, 2006. – С. 245.

4. Шелехова О. Г. Ковзання асинхронного двигуна при різних параметрах несиметрії напруги живлення // Науковий Вісник ДДМА. – 2013. – № 2 (12Е). – С.56 – 59.

5. Федоров М.М. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений / Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В. В сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика – Донецк – 1999. – Вып. 4. – С. 138. – 141.