

## **К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ВНУТРЕННЕЙ НЕСИММЕТРИИ И ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

*Пронина А.К., Путилин К.П.*

**Ключевые слова:** несимметрия электрических машин, нарушение изоляции, междуфазные емкости, дуговые замыкания, метод идентификации повреждений.

**Аннотация.** Вследствие нарушения изоляции электрических машин, появляется несимметрия, которая может быть выявлена путем контроля фазной изоляции по принципу несимметрии емкостных сопротивлений обмоток фаз относительно корпуса машины с изолированной нейтралью. Предлагаемый метод может быть применен при идентификации любого повреждения в виде касания обмоткой корпуса с целью быстрого диагностирования и отключения двигателя от сети. Выявление внутренних замыканий позволит увеличить эффективность срабатывания защит от дуговых КЗ короткозамкнутых обмоток внутри машины.

## **ON THE ISSUE OF BUILDING PROTECTION OF AN INDUCTION MOTOR FROM INTERNAL ASYMMETRY AND INTERNAL SHORT CIRCUITS**

*Pronina A.K., Putilin K.P.*

**Keywords:** asymmetry of electrical machines, insulation failure, interphase capacitances, arc faults, damage identification method.

**Abstract.** Due to a violation of the insulation of electrical machines, an asymmetry appears, which can be detected by monitoring phase insulation according to the principle of asymmetry of the capacitive resistances of the phase windings relative to the machine body with an isolated neutral. The proposed method can be used to identify any damage in the form of touching the body with a winding in order to quickly diagnose and disconnect the motor from the network. Identification of internal short circuits will increase the efficiency of operation of protection against short-circuit arc short-circuited windings inside the machine.

Анализ повреждений и аварий асинхронных двигателей, показывает, что большинство из них связано с нарушениями изоляции, ухудшением контактных соединений и короткими замыканиями [2].

В основу диагностирования фазной изоляции трехфазных обмоток электрических машин предлагается использовать принцип несимметрии емкостных сопротивлений обмоток фаз относительно корпуса машины с изолированной нейтралью обмотки статора. Зарождение повреждения и начальные стадии возникновения пробоя или дугового перекрытия вносят в трехфазную систему несимметрию [3], что приводит к возможному пробую изоляции или образованию дугового перекрытия.

Внутренние замыкания на начальной стадии носят преимущественно несимметричный характер, при этом и режим ёмкостных токов приобретает несимметрию, а потому может служить диагностическим признаком такого начала развития замыкания.

Емкости и проводимости утечки равномерно распределены вдоль фазной цепи относительно железа корпуса [4]. Для высоковольтных двигателей значения фазных емкостей приведены в таблице 1.

Табл. 1. Параметры высоковольтных электродвигателей по данным предприятия города Севастополя ООО «КБ Коммутационная аппаратура»

Мощность ЭД, кВт	Емкость обмотки фаз ЭД, нФ	КПД	cosφ	$I_{п}/I_{ном}$	Сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	Удельная индуктивность жилы кабеля, мкГн/м	Удельная емкость жилы кабеля, нФ/м
200	9,4	0,92	0,74	6,0	35	0,136	0,288
1000	14,6	0,994	0,84	5	70	0,101	0,39
3150	22,9	0,96	0,89	6,5	240	0,056	0,698

Степень несимметрии и ее «опасность» могут быть различны: от незначительного перекоса до дугового перекрытия между витками или между клеммами в коробке выводов. Большинство короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей выполнены без нейтральной точки, что исключает срабатывание наиболее эффективных дифференциальных релейных защит от внутренних коротких замыканий [1]. При этом статистика подтверждает, что запоздалое отключение двигателя от сети может повлечь за собой серьезные повреждения обмотки. Внутренние замыкания в начальной стадии имеют несимметричный характер, и выявление таких замыканий позволит увеличить эффективность срабатывания защит [5].

На рисунке 1 система питания обмотки представлена идеальным источником ЭДС с сопротивлением  $r_1 \approx 0$ . Для получения потенциала нейтрали ЭДС источника  $U_c$  предусматриваем симметричную искусственную звезду емкостей  $C_1$  с нейтралью  $N_1$ . Обмотку статора представляет звезда асинхронного двигателя 2. Сопротивление изоляции  $R_{И}$  фаз обмотки статора и фазные емкости  $C_{\phi}$  образуют звезду 3, нейтральной точкой  $N_2$  которой является корпус машины. Контроль несимметрии машины осуществляется по величине разности потенциалов нейтралей  $\Delta U_N = \varphi_{N_2} - \varphi_{N_1}$  при этом в нормальном режиме  $\Delta U_N = 0$ .

В случае ухудшения изоляции фазы обмотки статора нарушается симметрия фазных сопротивлений изоляции  $R_{\phi}$ , при этом потенциал  $\varphi_{N_2}$  нейтрали  $N_2$  изменится, в то время как потенциал  $\varphi_{N_1}$  нейтрали  $N_1$  остается неизменным. Нейтральная точка перемещается в положение  $N'_2$  (рисунок 2), при этом разность потенциалов  $\Delta U_N$  может служить диагностическим параметром состояния изоляции машины. Особенность  $\Delta U_{N'}$ , как источника ЭДС, является большое сопротивление, соизмеримое с сопротивлением

изоляции машины, что необходимо учитывать при разработке системы контроля за величиной  $\Delta U_N$ .

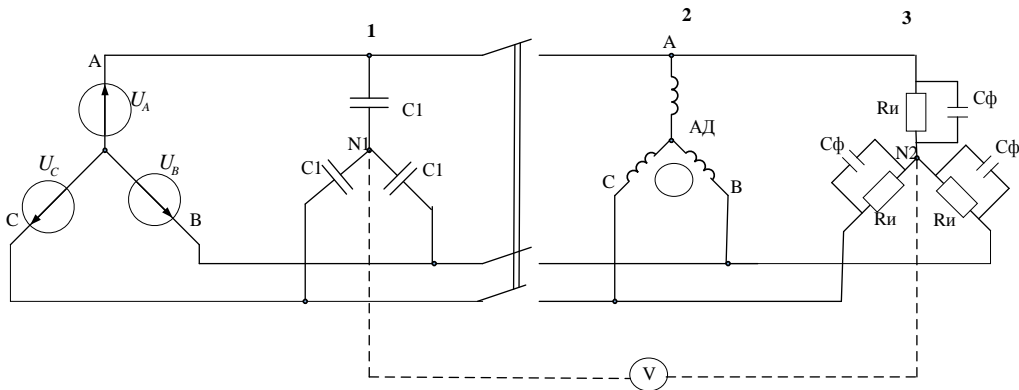


Рис. 1. Электрическая схема статора с учетом емкости изолированной обмотки относительно корпуса машины

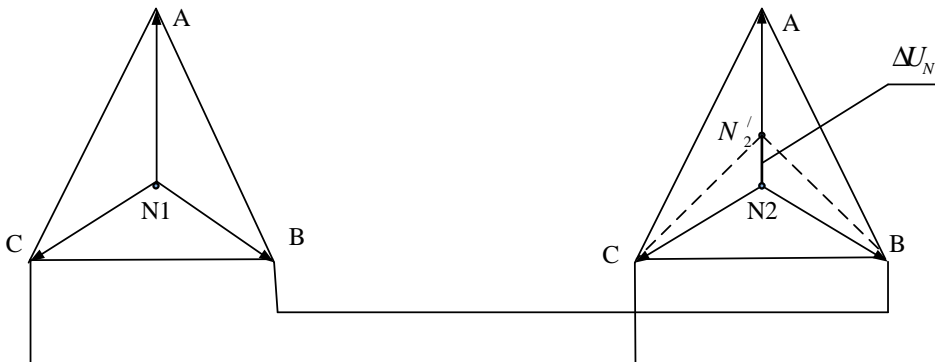


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений звезды 1 и звезды 3 для случая замыкания на корпус середины обмотки фазы А

Сопротивление лучей звезды 3 значительно превосходит сопротивление лучей звезды 2 обмотки статора, поэтому любое касание проводниками фазной обмотки корпуса машины мгновенно сообщает нейтрали  $N_2$  потенциал, равный потенциалу обмотки в месте касания. Так, если точка А (начало фазы А) коснется корпуса, то разность потенциалов  $\varphi_{N'2} - \varphi_{N1} = U$ , то есть станет равной фазному напряжению.

По представленной на рисунке 2 векторной диаграмме напряжений, разность потенциалов нейтралей:

$$\Delta U_N = \varphi_{N'2} - \varphi_{N1} = \frac{U_A}{2}.$$

Измерение величины и фазы напряжений между нейтральями показывает место повреждения обмотки. При любом повреждении в виде касания обмоткой корпуса вектор  $\Delta U_N$  оказывается строго ориентирован по фазному вектору напряжения.

В случае снижения сопротивления изоляции отдельной фазы статора такой строгой ориентации вектора  $\Delta U_N$  по фазным напряжениям не наблюдается. Это связано с комплексным характером сопротивлений лучей звезды 3: наличием активной и реактивной (емкостной) составляющих сопротивлений. Величина комплексного напряжения равна:

$$\Delta U_N = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (1)$$

где:  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  – фазные напряжения,

$\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C$  – комплексные проводимости фазной изоляции.

Рассмотрим пример снижения сопротивления фазной изоляции вдвое. В качестве исходных данных примем:  $R_{из} = 0,5 \text{ МОм}$ ,  $C_\phi = 1500 \text{ мкФ} = 1500 \cdot 10^{12} \text{ Ф}$ . В этом случае фазное напряжение  $R_{из,\phi} = 1,5 \text{ МОм}$  активная проводимость фазы  $g = 1/R_{из} = 0,667 \cdot 10^{-6} \text{ См}$ . Емкостная проводимость фазы  $b = \omega \cdot C_\phi = 0,47 \cdot 10^{-6} \text{ См}$ . При уменьшении  $R_{из,\phi}$  вдвое, проводимость  $g$  возрастет в два раза. Напряжение фаз при этом:

$$\underline{U}_A = 1; \underline{U}_B = 0,5 + j0,866; \underline{U}_C = -0,5 - j0,866.$$

Полагая, что сопротивление изоляции фазы А уменьшилось вдвое, по (1) находим:

$$\Delta U_N = 0,196 - j0,103 - 0,221e^{-j28^\circ}.$$

Таким образом, несимметричное (только в фазе А) снижение изоляции вдвое приводит к появлению сигнала, составляющего 22,1% от величины фазного напряжения с отставанием от напряжения фазы А на  $28^\circ$ . Наличие угла сдвига показывает, что это не механическое замыкание обмотки на корпус.

Замыкание части витков фазы между собой возможно в многовитковой секции, расположенной в одной паре пазов (рисунок 3). В таком случае в машине возникает несимметричный режим по току: ток поврежденной фазы возрастает, при этом в замкнутых витках увеличение тока будет значительным (в десятки раз), в то время как в самой фазе ток практически не изменится. Это объясняется тем, что замкнутая часть фазной обмотки оказывается в режиме короткого замыкания [3]. Тем не менее это опасное замыкание практически не вызовет появления  $\Delta U_N \neq 0$ . В случае же дугового характера замыкания, которое мгновенно переключает обмотку и корпус, возникает  $\Delta U_N \gg 0$ .

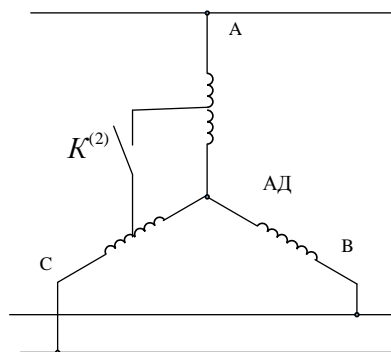


Рис. 3. Электрическая схема статора при замыкании между витками двух обмоток

Рассмотрим случай несимметрии, вызванный обрывом линейной цепи, например цепи фазы А между точками 1 и 2 (рисунок 1). Положим проводимость фазы А относительно корпуса  $\underline{Y}_A = 0$ , тогда сопротивление изоляции фазы А будет определяться:

$$\Delta U_N = \frac{U_B \cdot \underline{Y}_B + U_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

Положив далее  $\underline{Y}_B = \underline{Y}_C$  имеем:

$$\Delta U_{NN} = \frac{U_B + U_C}{2} = -\frac{U_A}{2}.$$

Таким образом, этот вид повреждения, опасный для работающих машин, может быть выявлен и идентифицирован с помощью предлагаемого метода. Наиболее вероятен случай потери фазы при использовании защиты плавкими предохранителями или вследствие отказа контактов одной из трехфазного выключателя, а также в случае приваривания одного из контактов выключателя при отключении.

Пусть звезда емкостей 1, образующих искусственную нейтраль питающего напряжения (или ЭДС), включена до выключателя (рисунок 1). В этом случае при замыкании (приваривании), например, контакта фазы А получаем:

$$\Delta U_{NN} = \frac{U_A + \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A} = \underline{U}_A \neq 0.$$

Следовательно, данный вид неисправности может быть идентифицирован (распознан) с помощью предлагаемого метода, например, передан на сигнал.

Быстрое диагностирование емкостной несимметрии и отключение двигателей от сети питания не решает полностью проблему повреждений от дуговых КЗ. Защита АД, построенная на предлагаемом методе может служить существенным дополнением, повышающим эффективность существующих защит двигателей для наиболее распространенных и опасных видов

повреждений, таких как замыканий в коробке выводов и корпус, неполнофазных режимов, приваривания контактов. Одновременно, используя данный метод, можно строить действия защиты на сигнал при снижении сопротивления изоляции работающей машины.

### Список литературы

1. Андреев В.А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах: Уч. пособие. – М.: Высш.школа, 2008. – 252с.
2. Воробьев Н.П. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под.ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат., 1984. – 240с.
4. Шабат М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35кВ. – М.: НТФ, «Энергопрогресс», 2007. – 64с.
5. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007 – 549с.

### References

1. Andreev V.A. relay protection of power supply systems in examples and tasks: Teaching manual. – М.: Higher.school, 2008. – 252p.
2. Vorobyov N.P. Methods and devices for diagnosing isolation of asynchronous motors / N.P. Vorobyov, S.N. Vorobyov, G.V. Sukhankin, N.T. Herzen // Polzunovsky Vestnik. 2011. No. 2/2.
3. Syromyatnikov I.A. operating Modes of asynchronous and synchronous motors / by ed. L.G. Mamikonyants. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 240p.
4. Shabad M.A. Protection from single-phase earth faults in networks of 6-35 kV – М.: NTF, "Energoprogress", 2007. – 64p.
5. Schneerson E.M. Digital relay protection. – М.: Energoatomizdat, 2007. – 549p.

<b>Пронина Анна Константиновна</b> – старший преподаватель кафедры «Судового электрооборудования», <a href="mailto:pronina-a@bk.ru">pronina-a@bk.ru</a>	<b>Pronina Anna Konstantinova</b> – senior lecturer of Department of Ship Electrical Equipment, <a href="mailto:pronina-a@bk.ru">pronina-a@bk.ru</a>
<b>Путилин Константин Петрович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети», <a href="mailto:putilin-kp39@bk.ru">putilin-kp39@bk.ru</a>	<b>Putilin Constantine Petrovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of Department «Renewable energy sources and electrical systems and networks», <a href="mailto:putilin-kp39@bk.ru">putilin-kp39@bk.ru</a>
Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, Россия	Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Received 21.12.2019