

УДК 621.876.32

Диагностирование обрыва фазы обмотки фазного ротора в частотно - регулируемом электроприводе

Попов Евгений Владимирович,

доцент кафедры, канд. техн. наук

kb515@mail.ru

Михайлузов Александр Константинович,

студент

mixalamp@mail.ru

Кафедра «Судовые энергетические установки, электрооборудование судов и автоматизация», Академия водного транспорта Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Аннотация. В данной работе приведено описание характерных признаков неисправности асинхронного двигателя с фазным ротором — обрыв одной из фаз ротора при питании от преобразователя частоты с векторным управлением. Обрыв фазы обмотки ротора при векторном управлении трудно диагностируется и может быть не замечен обслуживающим персоналом. Использование встроенных измерительных и вычислительных возможностей преобразователя частоты позволяет получить диагностический признак неисправности и построить защиту.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель с фазным ротором, преобразователь частоты, обрыв фазы обмотки ротора, аналоговый выход, диагностический признак

Diagnostics of phase break in phase rotor winding in a frequency-adjusted electric drive

Popov Evgeny Vladimirovich,

Associate Professor of the Department,
Candidate of Technical Sciences

kb515@mail.ru

Mikhailusov Alexander Konstantinovich,

Student

mixalamp@mail.ru

Department of Marine Power Plants, Electrical Equipment of Ships and Automation, Academy of Water Transport of the Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Abstract. This paper describes the characteristic signs of a phase rotor asynchronous motor malfunction, such as a broken rotor phase when powered by a vector-controlled frequency converter. A broken rotor phase is difficult to diagnose and may go unnoticed by maintenance personnel. The use of the frequency converter's built-in measurement and computational capabilities allows for the detection of the malfunction and the implementation of protection measures.

Keywords: asynchronous electric motor with a phase rotor, frequency converter, rotor winding phase break, analog output, diagnostic feature

При модернизации крановых электроприводов рационально использовать существующие на кране и исправные асинхронные двигатели.

Сохранение существующих электродвигателей позволяет заметно сократить как затраты на модернизацию, так и время ее проведения.

На отечественных кранах используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором серий МТ и 4МТ с классом изоляции F и H.

В большинстве случаев, при модернизации, крановых электроприводов устанавливаются преобразователи частоты, а в установленных электродвигателях закорачивается обмотка фазного ротора путем установки перемычек на выводах щеток.

С момента начала массового внедрения преобразователей частоты в крановом прошло уже более четверти века, и, в настоящее время, таким образом, модернизированы уже тысячи грузоподъемных машин. Многолетний опыт эксплуатации показал надежную совместную работу асинхронных электродвигателей с фазным ротором и преобразователей частоты. По наблюдению служб эксплуатации многократно снизился выход из строя преобразователей частоты из-за повреждения обмоток статора.

С точки зрения энергетики электродвигатели с фазным ротором серий МТ и 4МТ даже предпочтительней короткозамкнутых электродвигателей тех же серий, так как они имеют меньшее активное сопротивление обмотки ротора, и, следовательно, меньшие потери в меди ротора в установившемся режиме.

Электродвигатель с фазным ротором, выбранный для работы в традиционной системе кранового электропривода с реостатным регулированием при переводе его на питание от преобразователя частоты (если режим работы механизма не превышает) всегда имеет меньший уровень пусковых потерь. При векторном управлении, снижаются потери и в установившемся режиме, так как при частичной нагрузке в электроприводе производится оптимизация энергопотребления.

Однако, при данном способе модернизации не устраняется скользящий контакт между щетками и контактными кольцами, поэтому в редких случаях возможен обрыв цепи одной из фаз ротора из-за износа щеток или поломки щеткодержателя.

В электроприводах механизмов с активным моментом нагрузки наиболее опасным следствием обрыва обмотки ротора является потеря электродвигателем вращающего момента и падение груза.

Режим работы асинхронного электродвигателя при обрыве фазы обмотки ротора достаточно подробно описан [1]. Механическая характеристика $M_{рез}$ (рис. 1, а) при этом имеет провал при скольжении равном 0,5.

Если обрыв фазы ротора произошел перед пуском, то электродвигатель с закороченными двумя фазами ротора запустится до половинной скорости. При обрыве фазы ротора работающего двигателя режим его работы будет зависеть от нагрузки на валу. При моменте меньше номинального двигатель будет работать со скольжением близким к номинальному. При увеличении

момента нагрузки до номинального значения двигатель перейдет на половинную скорость, поскольку значение максимального момента при обрыве фазы ротора снижается.

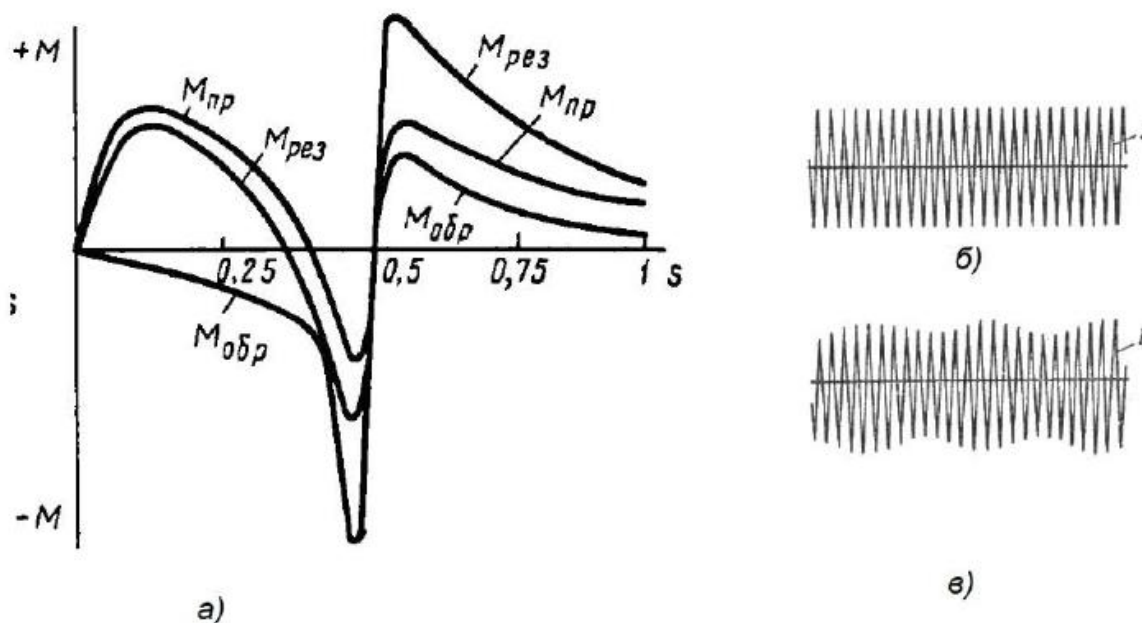


Рис. 1. Механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором (а) и осциллограммы тока статора при закороченных кольцах ротора (б) и обрыве одной из фаз (в)

Ток статора будет иметь биения, частота которых увеличивается с увеличением момента нагрузки на валу. Биения будут иметь также частота вращения и момент двигателя.

Указанные явления будут иметь место при питании электродвигателя от сети или от преобразователя частоты со скалярным управлением.

В свое время для выяснения работоспособности электропривода при обрыве фазы ротора на стенде ООО «Кранприборсервис» автором был проделан эксперимент с электроприводом механизма подъема с преобразователем частоты типа Альтивар 71 и двигателем мощностью 55 кВт. Закон управления электродвигателем — векторный, бездатчиковый. Перед подъемом номинально груза «с веса» отключалась одна из фаз закороченного ротора у двигателя мощностью 55 кВт. После этого электропривод включался в направлении подъема с заданной частотой 50 Гц. При этом электропривод разгонялся в направлении подъема, однако во время разгона были отмечены колебания скорости.

На рис. 2 представлены экспериментальные осциллограммы скорости электропривода с закороченным ротором и при отключении одной из фаз в роторе [2]. Из осциллограмм видно, что разгон электропривода в направлении подъема с оборванной фазой в роторе длится примерно в 1,5 раза дольше, чем при полностью закороченных кольцах.

Однако аварийной ситуации, т. е. потери двигателем момента и падения груза при этом не происходит. Обрыв одной из фаз в цепи ротора может про-

изойти незамеченным для обслуживающего персонала и не вызывает срабатывание какой-либо защиты.

Таким образом, при векторном управлении поведение электродвигателя с оборванной фазой ротора отличается от такового при питании его от сети.

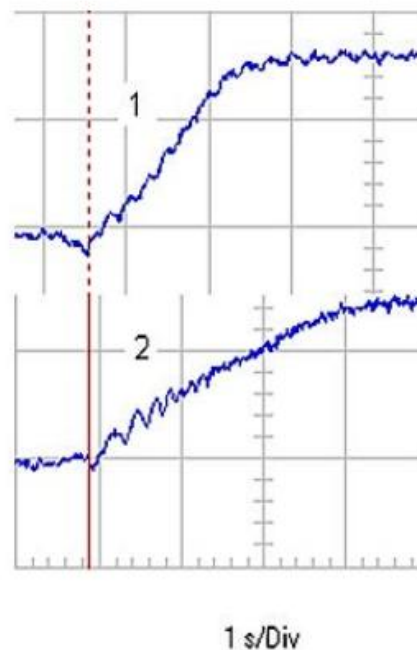


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы угловой скорости частотно-регулируемого электропривода механизма подъема с электродвигателем с фазным ротором мощностью 55 кВт при разгоне до номинальной скорости.

1 — контактные кольца закорочены; 2 — одна из фаз ротора оборвана

За годы последующие после описанного эксперимента применение электродвигателей с закороченным с фазным ротором приняло массовый характер. Поэтому актуальность построения защиты от обрыва цепи ротора только возросла.

Для исследования возможности диагностики обрыва фазы обмотки ротора и построения защиты в Академии водного транспорта РУТ МИИТ был смонтирован стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором М1 типа МТФ111-6, $P_2 = 3,5$ кВт, $I_{1н} = 10,4$ А, $I_{2н} = 15$ А, $n = 895$ об/мин соединен с валом нагрузочной машины постоянного тока М2, якорь которой замкнут на нагрузочный резистор R_n , сопротивление которого ступенчато может изменяться. Асинхронный электродвигатель получает питание от преобразователя частоты (далее ПЧ) типа АТV71. Обмотка фазного ротора закорочена. Цепь одной из фаз обмотки ротора можно отключить автоматическим выключателем QF2.

Значение тока статора контролируется встроенными средствами измерения ПЧ. Для измерения тока ротора в неразмыкаемую цепь обмотки ротора включен шунт $R_{ш}$.

На рис. 4. показана экспериментальная зависимость тока от относительного значения момента нагрузки на валу при симметричной обмотке ротора

и одной отключенной фазе. При номинальном моменте нагрузки в симметричном режиме ток статора имеет практически номинальное значение. При обрыве фазы измеренный внутренними средствами ПЧ ток статора возрастает на 21 %.

На экспериментальных осциллограммах тока ротора на рис. 5 в симметричном и несимметричном режимах видно, что в несимметричном режиме амплитудное значение тока возрастает на 47 %.

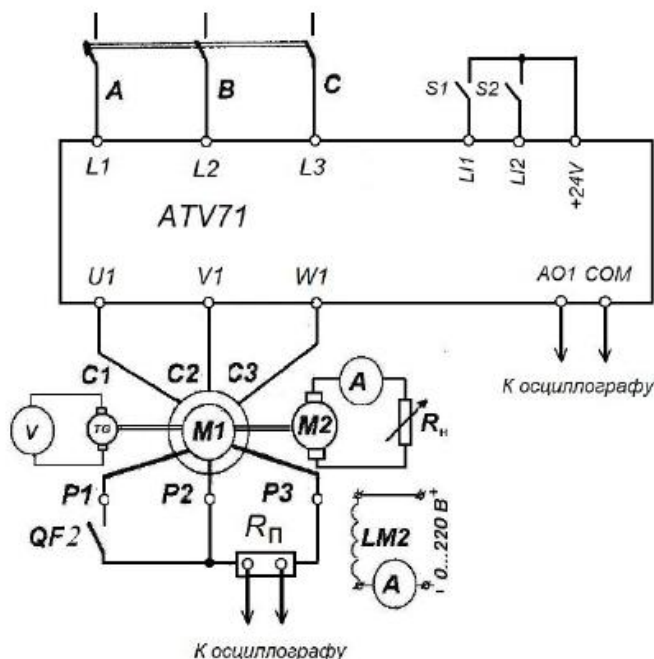


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования режима обрыва фазы обмотки ротора

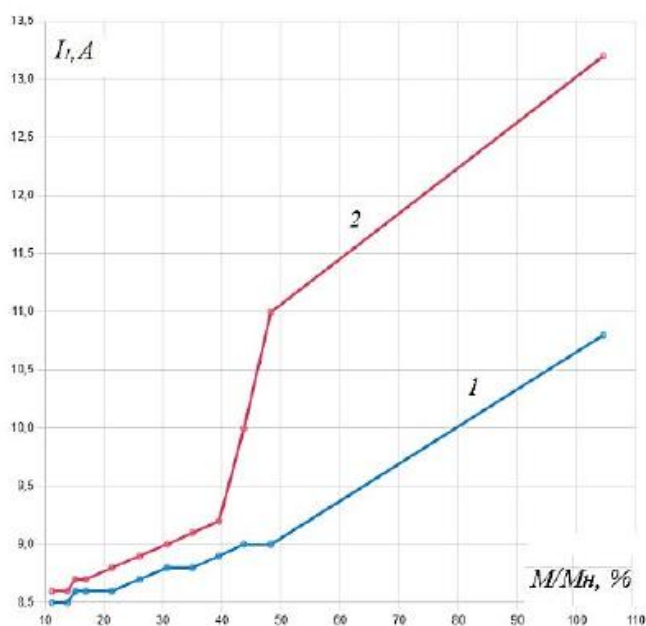


Рис. 4. Зависимость тока статора от момента нагрузки:
1 — контактные кольца закорочены; 2 — одна из фаз ротора оборвана

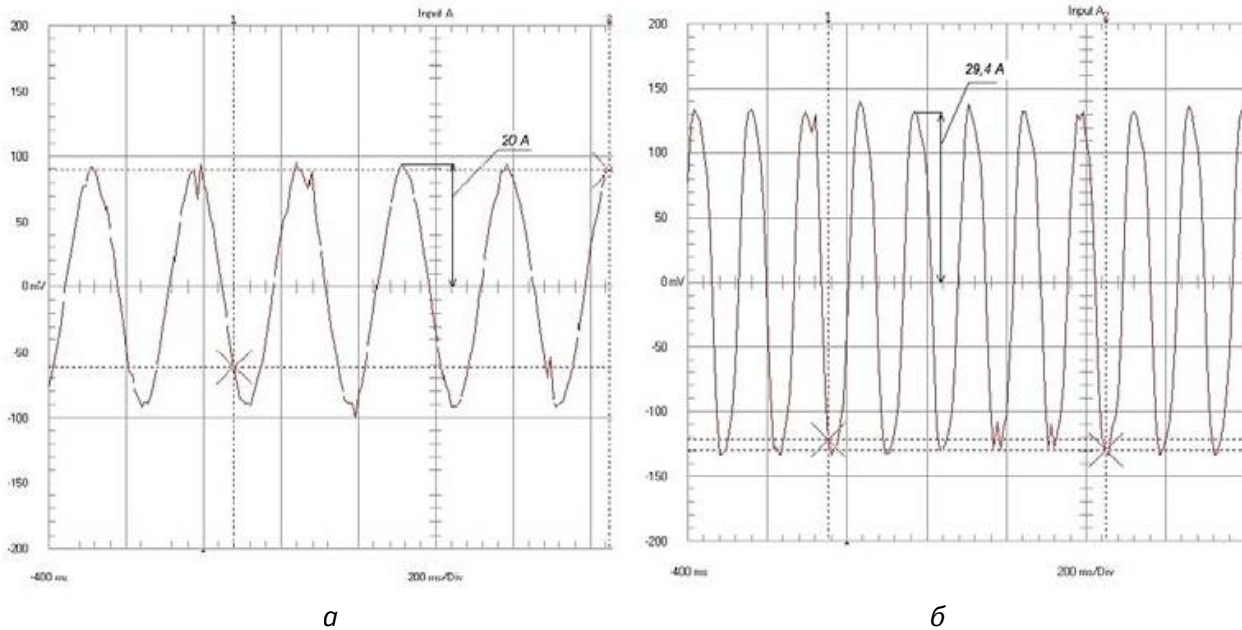


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы тока ротора:
 а — контактные кольца закорочены; б — одна из фаз ротора оборвана

Таким образом, возможна тепловая перегрузка оставшихся в работе двух фаз цепи ротора, при которой встроенная защита от перегрузки по току статора не сработает. Это может привести к отгоранию перемычки или выводов ротора к контактным кольцам, полному размыканию цепи ротора и потери электродвигателем момента.

Известные способы диагностики обрыва цепи ротора базируются на следующих принципах [3, 4]:

- анализ вибрации асинхронного двигателя;
- анализ спектра тока статора асинхронного двигателя. Согласно [3] методы, основанные на этих принципах наиболее эффективны

Обе группы методов диагностики обрыва стержней ротора предназначены в первую очередь на предремонтную дефектацию электрической машины и требуют специального оборудования и программного обеспечения. Такие методы предлагаются для диагностики роторов в первую очередь крупных высоковольтных машин, разборка которых на объектах сопряжена с большими трудностями. Между тем при использовании преобразователей частоты совместно с асинхронными двигателями с закороченным фазным ротором, появляется возможность использовать для обнаружения обрыва обмотки ротора встроенные средства ПЧ.

ПЧ практически всех производителей имеют аналоговый выход — клеммы, напряжение на которых изменяется в диапазоне 0–10 В пропорционально какой-либо величине (например, выходная частота, ток статора, относительное значение момента).

Поскольку при обрыве обмотки ротора ток статора, частота вращения, а значит и момент имеют биения, диагностическим параметром было выбра-

но относительное значение момента. Наименьшую частоту, биения момента имеют при небольшой нагрузке на валу. На рис. 6 представлен выходной сигнал аналогового выхода ПЧ, сконфигурированный на относительное значение момента. Нагрузка на валу при этом составляла 10% от номинальной.

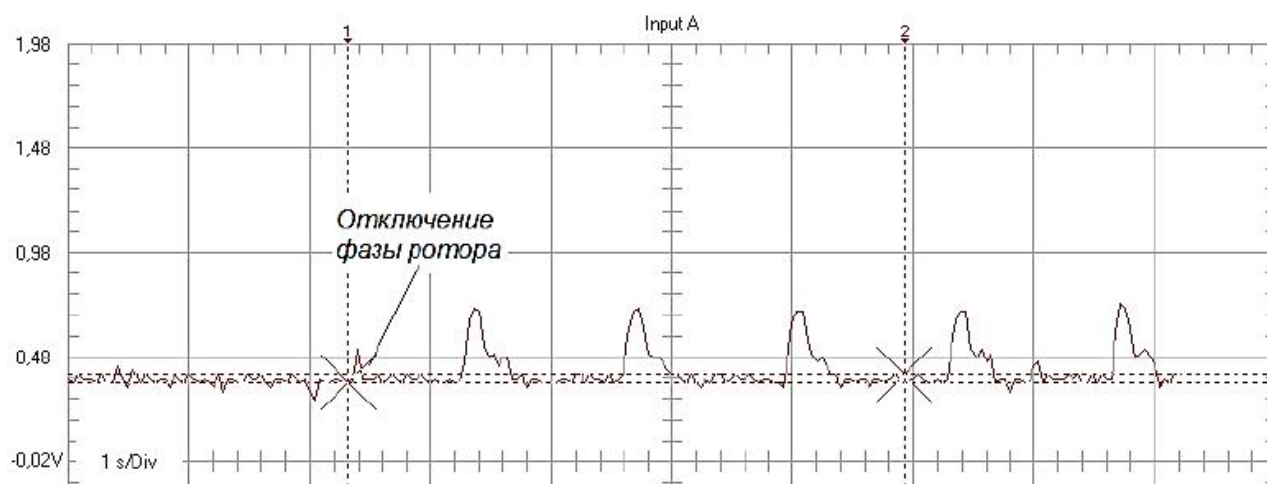


Рис. 6. Выходное напряжение аналогового выхода ПЧ, пропорциональное относительному значению момента при отключении одной фазы ротора

На рис. 6 видно отчетливые периодические пики момента, которые и могут быть приняты за диагностический признак. Выделение таких пиков напряжения не составляет сложности и может быть произведено как внешним устройством, которое в настоящее время находится в состоянии разработки, так и производиться программно, что требует доработки программного обеспечения ПЧ и включения аварийного признака «Обрыв фазы обмотки ротора» в перечень встроенных защит ПЧ.

Данная защита не требует быстрого действия, а режим работы близкий к холостому ходу всегда существует в цикле работы электропривода механизма подъема.

Таким образом, использование встроенных функций преобразователей частоты, а именно сигнала аналогового выхода, пропорционального относительному значению момента позволяет при векторном управлении выделить диагностический признак обрыва одной из фаз обмотки ротора и использовать его для защиты электропривода от потенциальной аварии.

Список источников

- [1] Радин В.И. и др. *Электрические машины. Асинхронные машины*. Москва, Высшая школа, 1988, 328 с.
- [2] Попов Е.В. Использование асинхронных двигателей с фазным ротором в частотнорегулируемом электроприводе при модернизации кранового электрооборудования. *Подъемно-транспортное дело*, 2008, № 4, 23 с.

-
- [3] Баннов Д.М. *Метод диагностирования обрыва стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя на основе анализа токов статора*. Дис. ... канд. техн. наук, Омск, 2023, 139 с.
 - [4] Васильева Ю.З., Полищук В.И. Диагностика повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя. *Технические науки в России и за рубежом. IV Междунар. науч. конф.: матер.* Москва, Буки-Веди, 2015, с. 50–53.