

1. При питании асинхронных двигателей многодвигательного электропривода от индивидуальных ПЧ для управления суммарным моментом привода можно использовать градиентное управление моментом АД по закону (1).
2. При групповом питании асинхронных двигателей от одного ПЧ, градиентное управление моментом АД по закону (1) рекомендуется применять только для многодвигательных электроприводов, в которых в силу экономичности системы управления контролируется состояние только одного двигателя, а разброс параметров АД не превышает 5...10 %.
3. Для многодвигательных асинхронных электроприводов с групповым подключением двигателей к преобразователю частоты высокого качества управления суммарным моментом привода при разбросе параметров АД в широком диапазоне можно добиться с применением закона (2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. Завьялов В. М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин. – Кемерово: КузГТУ, 2008. – 172 с.
4. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

Поступила 25.06.2009 г.

УДК 621.313.333

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ КРУПНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. Бейерлейн

Томский политехнический университет
E-mail: BeierleinEV@sibmail.com

Разработана схема взаимной нагрузки для проведения испытаний крупных асинхронных тяговых электродвигателей. Схема взаимной нагрузки позволит экономить электроэнергию в процессе испытаний и может быть использована на испытательных станциях крупных электрических машин подвижного состава.

Ключевые слова:

Схема испытаний, асинхронный тяговый электродвигатель, схема взаимной нагрузки, энергосбережение.

Key words:

Test pattern, induction traction motor, back-to-back circuit, energy saving.

Введение

Электрическая энергия имеет большое преимущество перед другими видами энергии: ее, возможно, передавать на большие расстояния, удобно распределять между потребителями, просто и с высоким коэффициентом полезного действия преобразовывать в другие виды энергии. В современных условиях ограничения природных ресурсов и постоянного повышения стоимости электрической энергии перед наукой стоит задача снижения энергопотребления путем внедрения энергосберегающих технологий.

В настоящее время в эксплуатации находятся сотни тысяч электрических машин (ЭМ) средней мощности до 1000 кВт, применяемые в качестве тяговых или вспомогательных машин. Многие из них выработали свой ресурс или приближаются к этому. Замена их новыми по разным причинам производится не достаточными темпами. Это увеличива-

ет число отказов ЭМ, объем ремонтных работ и соответственно затраты.

Современное состояние тяговых и вспомогательных электрических машин (ТЭД и ВЭМ) на железнодорожном транспорте характеризуется низкой надежностью, высокой аварийностью и средним фактическим сроком службы до ремонта не превышающем 600 тыс. км пробега. Это приводит к повышенным затратам на восстановление и к снижению безопасности перевозок. Имеются попытки повысить срок службы применением новых материалов и технологий, но они носят не системный характер, и решить проблему не могут. Для оценки ресурса ТЭД и ВЭМ нет методик, не организован мониторинг состояния электрических машин, без которого невозможно говорить об оценке остаточного ресурса, а значит о переходе на восстановительный ремонт по фактическому состоянию. Решение этой задачи актуально, так как старею-

ший парк электрических машин с каждым годом требует увеличения затрат на восстановление. По прогнозам специалистов коллекторные ТЭД будут эксплуатироваться в России еще не менее 30 лет. Переход на асинхронные ТЭД (АТЭД) вызовет полное переоснащение ремонтной базы, включая испытательные станции для АТЭД и преобразователей частоты, которые в стране не производятся.

Испытаниям подвергается каждый изготовленный АТЭД с целью проверить правильность сборки и получения подтверждения, что по электрическим и механическим показателям соответствуют ГОСТ. Требования к качеству и надежности ТЭД постоянно повышаются. Одним из путей выполнения этих требований является строгое соблюдение условий испытаний, проводимых на всех этапах изготовления, и объективная оценка данных, полученных в процессе испытаний. По оценке специалистов затраты труда на проведение приемо-сдаточных испытаний сегодня составляют до 13 % от трудоемкости изготовления ЭМ. Так бригаде из 3–4 человек требуется более 3 ч на проведение испытаний и около 1 ч на обработку материалов испытаний и оформление документов. Затраты электроэнергии на приемо-сдаточные испытания двух ТЭД составляют около 1,5 тыс. кВт·ч. Основные испытания выполняются под нагрузкой. Учитывая, что мощность ТЭД сравнительно велика, то их испытания, с целью экономии электроэнергии, осуществляют методом взаимной нагрузки (возвратной работы). В этом случае испытывается одновременно два ТЭД: один работает в режиме ЭД, второй – в режиме генератора. Компенсация потерь осуществляется одним из известных методов.

Для асинхронных ВЭМ такие схемы не применяются. Для асинхронных тяговых электродвигателей испытательных станций с реализацией энергосберегающей технологии в настоящее время не существуют. Учитывая, что перспектива широкого применения АТЭД велика и уже сейчас имеются опытные образцы электровозов с асинхронными ТЭД, задача создания таких испытательных станций является актуальной.

Разработка схемы

Основные испытания ТЭД выполняются под нагрузкой. С этой точки зрения наиболее экономичными являются схемы испытания ЭМ по методу взаимной нагрузки, когда две ЭМ соединены электрически и механически. Таким образом, что одна из них, работая в режиме генератора, отдает всю вырабатываемую электрическую энергию второй ЭМ, работающей в режиме двигателя, а последняя расходует всю развиваемую механическую энергию на вращение первой ЭМ [1, 2]. Энергия извне потребляется только на покрытие потерь в схеме. Схема взаимной нагрузки широко применяется для испытаний крупных ТЭД постоянного тока.

Испытания двух одинаковых асинхронных двигателей по методу взаимной нагрузки с непосред-

ственным соединением их валов до настоящего времени были невозможны, так как частоты вращения двигателя и генератора при равном числе полюсов различны [3]. В известной схеме соединение производится с помощью механической передачи, а заданные частоты вращения реализуются подбором диаметров шкивов, устанавливаемых на валах испытуемых машин, или передаточного отношения редуктора [4]. Отметим, что мощность асинхронной машины при неизменном напряжении зависит только от величины скольжения, поэтому способ подключения механического источника энергии в данном случае оказывается неприемлемым. Применяется лишь способ параллельного включения источника питания, рис. 1.

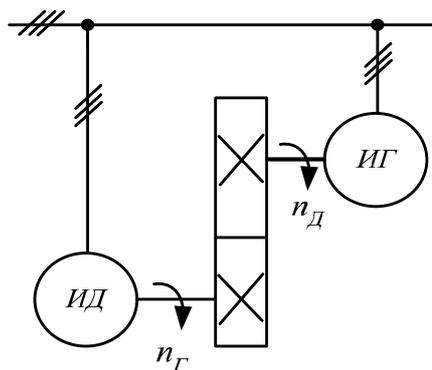


Рис. 1. Принципиальная схема испытания асинхронных машин

В настоящее время благодаря развитию силовой проводниковой техники создаются и выпускаются серийно различные виды полупроводниковых преобразователей частоты, что определило широкое применение частотно-регулируемого асинхронного привода, основным достоинством которого является плавность регулирования и высокая жесткость механических характеристик, экономичность привода.

Питание АТЭД на опытных образцах электровозов осуществляется от статического преобразователя частоты. Поэтому испытания целесообразно проводить с использованием таких преобразователей. В связи с этим предлагается схема испытания АТЭД в часовом режиме, использующая два одинаковых двигателя, рис. 2. В данной схеме электрические машины соединены электрически и механически, так, что одна из них, работая в генераторном режиме, отдает выработанную энергию второй, а последняя, работая двигателем, расходует развиваемую механическую энергию на вращение первой [5, 6].

Комбинацией контакторов К1–К4 можно обеспечить работу каждого из АТЭД от преобразователя частоты (ПЧ). При этом один АТЭД работает в качестве двигателя, а второй – в режиме генератора и наоборот.

Для того, чтобы асинхронную машину ввести в генераторный режим, ей необходимо задать частоту вращения выше синхронной, т. е. обеспечить от-

рицательное скольжение относительно частоты возбуждения. Поэтому испытуемый двигатель должен питаться от ПЧ при частоте выше сетевой.

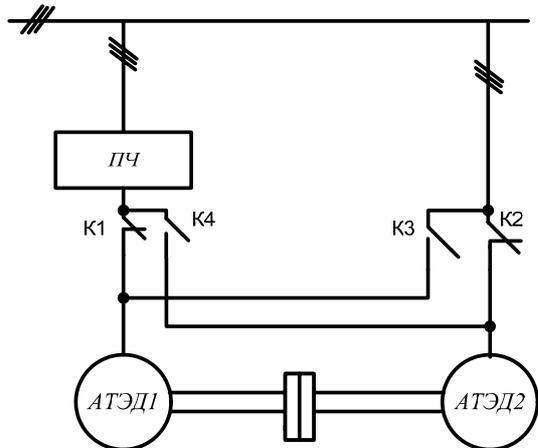


Рис. 2. Схема испытания АТЭД

Так как испытания в часовом режиме проводятся в номинальных условиях работы исследуемых двигателей, то для определения частоты питания второго двигателя в режиме генератора можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} n_d &= n_{0d}(1 - s_d), \\ n_g &= n_{0g}(1 - s_g), \end{aligned} \quad (1)$$

где s_d и s_g – величины скольжения двигателя и генератора.

Синхронные частоты вращения для каждой машины определяются как:

$$n_{0d} = \frac{60 \cdot f_d}{p}, \quad n_{0g} = \frac{60 \cdot f_g}{p}, \quad (2)$$

где f_d и f_g – частоты питания двигателя и сети; p – число пар полюсов.

Поскольку в схеме испытания исследуемые двигатель и нагрузочный генератор соединены между собой механически муфтой, то частота вращения ротора двигателя и ротора генератора будут равны $n_d = n_g$. Тогда из уравнений (1) и (2) имеем:

$$\frac{60 \cdot f_d}{p}(1 - s_d) = \frac{60 \cdot f_g}{p}(1 - s_g). \quad (3)$$

Из выражения (3) выразим частоту питания двигателя от преобразователя частоты:

$$f_d = f_g \cdot \frac{1 - s_g}{1 - s_d}. \quad (4)$$

Двигатель, работающий в генераторном режиме, должен вращаться посредством первичного двигателя в направлении вращающегося поля статора, но при скорости, больше синхронной. При этом движение ротора относительно поля статора изменится (по сравнению с двигательным режимом этой машины), т. к. ротор будет обгонять поле статора.

Обоснование

Рассмотрим подробнее потоки энергии в схеме взаимной нагрузки для АТЭД описанной выше. Испытуемый двигатель работает в двигательном режиме при $0 < s < 1$, $n_s < n_{0s}$. В этом режиме к нему подводится электрическая мощность P_1 , которая, за вычетом потерь на нагрев обмоток статора Δp_{M1} и магнитных потерь в стали статора Δp_{C1} , преобразуется в электромагнитную мощность $P_{ЭМ}$, передаваемую через воздушный зазор на ротор. Полная механическая мощность, развиваемая двигателем, определится как $P_{МЭХ} = P_{ЭМ} - \Delta p_{M2} - \Delta p_{C2}$, где Δp_{M2} – потери на нагрев обмоток ротора двигателя, Δp_{C2} – магнитные потери в стали ротора. Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше мощности $P_{МЭХ}$ на суммарные механические потери $\Delta p_{МЭХ}$, создающие момент сопротивления двигателя. В соответствии с энергетической диаграммой (рис. 3) для двигательного режима работы [7]:

$$P_2 = P_1 - \Delta p_{M1} - \Delta p_{C1} - \Delta p_{M2} - \Delta p_{C2} - \Delta p_{МЭХ}. \quad (5)$$

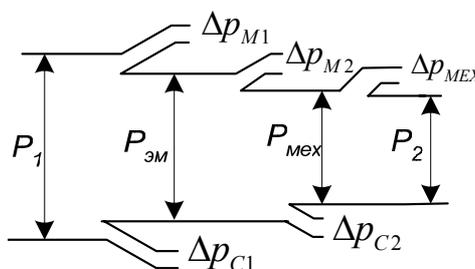


Рис. 3. Энергетическая диаграмма двигателя

Диаграмма потерь мощности в исследуемой машине, работающей в генераторном режиме, будет аналогичной потерям мощности машины, работающей в двигательном режиме, за исключением суммарных механических потерь, которые будут компенсироваться в испытуемой машине, работающей в двигательном режиме.

Поскольку двигатель и генератор работают во время испытаний совместно, то есть, связаны механически и электрически, следовательно, их энергетические диаграммы представляют последовательное объединение диаграмм машин работающих в двигательном и генераторном режимах, рис. 4.

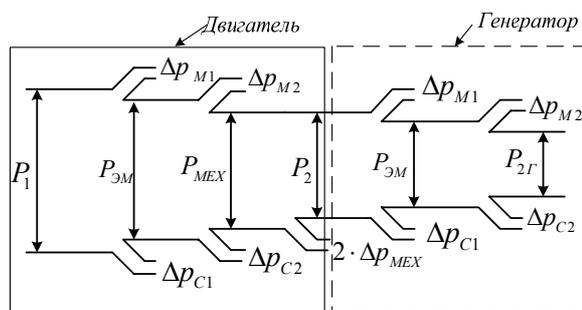


Рис. 4. Энергетическая диаграмма системы асинхронный двигатель – асинхронный генератор

Для определения экономии электроэнергии вычислим коэффициент экономичности схемы K_3 . Он будет равен отношению разности активных мощностей, потребляемых испытуемой электрической машиной, и схемой испытаний в целом, к потребляемой активной мощности испытуемой электрической машины, который определяется как:

$$K_3 = \frac{P_1 - P_{cx}}{P_1}, \quad (6)$$

где $P_1 = P_2 / \eta_d$ – активная мощность, потребляемая испытуемой электрической машиной; P_{cx} – мощность, потребляемая схемой в целом; η_d – КПД двигателя.

Мощность, потребляемая схемой испытания, определяется как:

$$P_{cx} = P_1 - P_{1r}, \quad (7)$$

где $P_{1r} = P_2 \cdot \eta_d$ – активная мощность, вырабатываемая двигателем, работающим в генераторном режиме.

Подставив в выражение (6) выражения (7) мы получим коэффициент экономичности схемы взаимной нагрузки:

$$K_3 = \frac{\frac{P_2}{\eta_d} - P_2 \left(\frac{1 - \eta_d \cdot \eta_r}{\eta_d} \right)}{\frac{P_2}{\eta_d}} = \eta_d \cdot \eta_r. \quad (8)$$

Как видно из выражения коэффициент экономичности зависит от КПД испытуемых машин, а потери мощности обеих машин покрываются в испытательной установке за счет первичной сети.

Проведем сравнительный анализ схем испытания на примере АТЭД НТА-1200 со следующими номинальными параметрами: $P_H = 1200$ кВт; $U_H = 1300$ В; $I_1 = 385$ А; $n_H = 1295$ об/мин; $f_H = 65,4$ Гц; $\eta_H = 0,957$; $\cos \varphi_H = 0,861$ [8].

Наиболее распространенная схема испытаний асинхронного тягового электродвигателя (АТЭД) по методу возвратной нагрузки без согласования с сетью позволяет одновременно уменьшить установленную мощность и регулировать частоту и амплитуду питающего напряжения. Для испытания АТЭД магистральных электропоездов в ОАО ВЭЛНИИ используется схема возвратной нагрузки с покрытием потерь мощности от ДПТ [2].

Коэффициент экономичности этой схемы:

$$K_3 = 1 - \frac{1 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4}{\eta_4 \cdot \eta_5} = (0,75 \dots 0,65),$$

где $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$ – КПД электрических машин, входящих в состав схемы по методу возвратной нагрузки без согласования с сетью.

Мощность, которую экономим во время испытания по схеме возвратной нагрузки:

$$P_3 = \frac{P_{2H}}{\eta_H} \cdot K_3 = \frac{1200}{0,957} \cdot 0,7 = 877,74 \text{ кВт.}$$

Мощность, которая расходуется на покрытие потерь в схеме:

$$P_{пот} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_3 = \frac{1200}{0,957} - 877,74 = 376,18 \text{ кВт.}$$

Количество потребленной электроэнергии:

$$W = P_{пот} \cdot t = 376,18 \cdot 1 = 376,18 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

где t – время проведения испытания согласно ГОСТ 2582-81 составляет 1 ч.

Стоимость потребленной электроэнергии:

$$C_1 = W \cdot C_A = 376,18 \cdot 1,92 = 722,27 \text{ р.}$$

где C_A – стоимость электроэнергии за 1 кВт·ч [9].

Схема для испытаний АТЭД по методу возвратной нагрузки без согласования с сетью содержит много вспомогательных машин, что приводит к дополнительным преобразованиям энергии. С учетом недостатков схемы возвратной нагрузки таких как, наличие вспомогательных машин, что приводит к увеличению площади испытательной станции, усложнению схемы управления и увеличивает количество преобразований энергии, была предложена схема взаимной нагрузки. Данная схема позволила минимизировать имеющиеся недостатки схемы возвратной нагрузки. Коэффициент экономичности схемы:

$$K_3 = \eta_d \cdot \eta_r = 0,94 \dots 0,88.$$

Мощность, которая экономится во время испытания по схеме взаимной нагрузки:

$$P_3 = \frac{P_{2H}}{\eta_H} \cdot K_3 = \frac{1200}{0,957} \cdot 0,9 = 1065,83 \text{ кВт.}$$

Мощность, которая расходуется на покрытие потерь в схеме:

$$P_{пот} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_3 = \frac{1200}{0,957} - 1065,83 = 188,09 \text{ кВт.}$$

Количество потребленной электроэнергии:

$$W = P_{пот} \cdot t = 188,09 \cdot 1 = 188,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Стоимость потребленной электроэнергии:

$$C_2 = W \cdot C_A = 188,09 \cdot 1,92 = 361,13 \text{ р.}$$

Экономия стоимости потребленной электроэнергии при проведении испытаний методом взаимной нагрузки по сравнению с возвратной нагрузки для испытания АТЭД с покрытием потерь мощности от двигателя постоянного тока:

$$\Delta_3 = C_1 - C_2 = 722,27 - 361,13 = 361,14 \text{ р.}$$

Процент экономии стоимости потребленной электроэнергии при проведении испытаний методом взаимной нагрузки по сравнению с возвратной нагрузки для испытания АТЭД с покрытием потерь мощности от двигателя постоянного тока:

$$\Delta_{\%} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = \frac{722,27 - 361,13}{722,27} \cdot 100 \% = 50 \%.$$

Так как при использовании метода взаимной нагрузки во время испытаний одновременно испытаниям подвергаются два АТЭД, то будет более справедливо рассчитать стоимость испытания, приходящуюся на один двигатель:

$$C_{2\text{ВД}} = \frac{C_2}{m} = \frac{361,13}{2} = 180,57 \text{ р,}$$

где m – количество одновременно испытываемых двигателей.

Удельная экономия стоимости потребленной электроэнергии при проведении испытаний методом взаимной нагрузки по сравнению со схемой возвратной нагрузки для испытания АТЭД с покрытием потерь мощности от ДПТ.

$$\mathcal{E}_{\text{ЭВД}} = C_1 - C_{2\text{ВД}} = 722,27 - 180,57 = 541,7 \text{ р.}$$

Удельный процент экономии стоимости потребленной электроэнергии при проведении испытаний методом взаимной нагрузки по сравнению со схемой возвратной нагрузки для испытания АТЭД с покрытием потерь мощности от двигателя постоянного тока:

$$\mathcal{E}_{\% \text{ЭВД}} = \frac{C_1 - C_{2\text{ВД}}}{C_1} = \frac{722,27 - 180,57}{722,27} \cdot 100 \% = 75 \%.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 506 с.
2. Щербаков В.Г. Тяговые электродвигатели электровозов. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с.
3. Радин В. И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
4. Котеленц Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.
5. Бейерлейн Е.В., Цукублин А.Б., Рапопорт О.Л. Схема испытания тяговых частотно – регулируемых асинхронных электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 46–48.
6. Пат. на ПМ 80018 РФ. МПК⁸ G01R 31/04. Устройство для испытания тяговых электродвигателей / Е.В. Бейерлейн, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин. Заявлено 21.04.2008; Опубл. 20.01.2009, Бюл. № 6. – 6 с.: ил.
7. Ключев В. И. Теория электропривода. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
8. Каталог электродвигателей. Новочеркасский электровозостроительный завод. [Электронный ресурс] – режим доступа <http://www.nevz.com/Ru/Katalog.pdf>. – 28.07.2009.
9. Приказ № 69/508 от 27.11.2007. РЭК Томской области. О тарифах на электрическую энергию, поставляемую потребителям Томской области. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://rec.tomsk.gov.ru/document/docto/12992.html>. – 10.06.2009.

Поступила 31.08.2009 г.

Для определения экономии за год воспользуемся данными по испытаниям ТЭД постоянного тока. В среднем на одной испытательной станции в год испытания проходят около 1000 ТЭД постоянного тока. Предположим, что при переходе на АТЭД объемы двигателей проходящих испытания останутся на том же уровне, тогда экономия стоимости потребленной электроэнергии при проведении испытаний методом взаимной нагрузки составит около 541 тыс. р.

Выводы

1. Предложен метод испытаний крупных асинхронных двигателей по схеме взаимной нагрузки с использованием преобразователя частоты, что позволяет экономить до 80 % потребляемой электроэнергии в процессе длительных испытаний.
2. Экономия электроэнергии и характеризующий ее коэффициент экономичности с использованием схемы испытаний напрямую зависит от вида испытываемых асинхронных двигателей и их КПД.
3. Экономический анализ при сравнении предложенной схемы взаимной нагрузки и традиционной показал экономию потребленной электроэнергии до 75 %.