УДК 621.313.333

**ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА,
ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ
РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ОБМОТКИ РОТОРА**

Е.О. Лавренов, З.С. Темлякова, А.А. Темляков

Новосибирский государственный технический университет

Работа посвящена проблематике электрической несимметрии асинхронных двигателей. В качестве объекта исследования выступает асинхронный двигатель, используемый для привода ответственных механизмов, в которых отключение двигателя при появлении несимметрии в процессе работы является крайне нежелательным. Выявлено, что источником провала механического момента при несимметрии цепи ротора выступают паразитные токи статора, наведенные в нем полем обратной последовательности ротора. Для их минимизации выбран метод принудительного задания токов статора. Рассмотрен принцип действия разработанного устройства, позволяющего устранить провал момента асинхронного двигателя при наличии несимметрии в обмотке ротора. С целью корректного выбора элементов устройства и его эффективной работы составлен алгоритм, состоящий из трех блоков: расчет максимальных токов статора при наличии несимметрии роторной цепи, выбор элементов устройства по найденным токам, оптимизация системы устройство–двигатель. В качестве демонстрации работы предложенного устройства проведено моделирование системы устройство–двигатель при наличии несимметрии электрических сопротивлений обмотки ротора и выполнена верификация полученных результатов. Отмечена эффективность устройства для решения задачи компенсации провала электромагнитного момента, вызванного несимметрией цепи ротора асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, моделирование, устройство питания, электрическая несимметрия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56

Введение

При эксплуатации крупных асинхронных двигателей возможно возникновение неисправностей, связанных с обмотками статора или ротора, результатом которых является появление в них электрической несимметрии. Используемая на сегодняшний день защита двигателей может лишь экстренно отключить двигатель при превышении заданного уровня тока в обмотках статора. Однако в некоторых отраслях промышленности (цементная, металлургическая, химическая) с непрерывным циклом производства это может оказаться крайне нежелательным по экономическим причинам или причинам, связанным с вопросами безопасности. Исходя из этого, возникает необходимость кратковременного устранения негативных воздействий несимметрии (в частности, снижения электромагнитного момента) с целью завершения производственной операции без сопутствующего отключению ущерба. Разработанное устройство питания асинхронного двигателя позволяет устранить провал механического момента, который проявляется при наличии электрической несимметрии в обмотке ротора двигателя.

Стоит отметить, что подавляющее большинство исследований, посвященных работе асинхронных двигателей в несимметричных режимах, рассматривает их негативное влияние на электрическую сеть и соответствующие методы его устранения [1–3]. В данной же работе рассмотрены физические процессы, происходящие непосредственно в двигателе, а для компенсации последствий несимметрии

предлагается воздействовать на первопричину – несимметричный асинхронный двигатель.

Целью данного исследования является разработка принципов синтеза устройства для его эффективной и надежной эксплуатации, верификация полученных результатов.

1. Теоретические основы синтеза устройства компенсации

В ходе проведенных исследований выявлено, что источником провала в механической характеристике асинхронного двигателя при несимметрии в цепи ротора выступает паразитный асинхронный момент, возникающий при воздействии магнитного потока обратной последовательности ротора на цепь статора.

Для минимизации этого паразитного момента необходимо ослабление силы тока обратной последовательности в роторе или статоре. Поскольку регулирование сопротивлений и индуктивностей ротора – довольно сложная задача, к тому же требующая конструктивной доработки ряда узлов электрической машины, то предпочтительнее осуществлять компенсацию провала механической характеристики со стороны статорной цепи.

Из ряда методов, пригодных для реализации поставленной задачи, выбран метод принудительного задания токов обмотки статора [4].

Принудительное задание токов обмоток статора реализуется с помощью принципиально нового разработанного устройства питания асинхронного двигателя (патент РФ № 2647882). Блок-схема данного устройства представлена на рис. 1.

Рис. 1 – Блок-схема устройства питания асинхронного двигателя для принудительного задания токов статора

Fig. 1 – Block diagram of induction motor supply equipment for stator current forced setting

Устройство работает следующим образом: при подаче напряжения питания задающий генератор 10 (рис. 1) формирует синусоидальные симметричные уровни напряжений, умножаемые на некоторый коэффициент, обратно пропорциональный среднему значению амплитуд фазных напряжений статора и ограниченный задаваемым максимальным пусковым током. Произведения напряжений на этот коэффициент подаются на сумматоры 4, 5, 6, на выходах которых формируются разностные составляющие токов задаваемых и токов, фактически протекающих по фазам статора асинхронного двигателя 20. Эта разностная составляющая управляет мостовыми инверторами 21, 22, 23 на основе широтно-импульсной модуляции – появление положительного сигнала токового рассогласования приводит к увеличению длительности импульса в периоде, из-за чего среднее значение напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23 повышается, и наоборот – отрицательный сигнал токового рассогласования снижает длительность импульса в периоде, что приводит к уменьшению среднего напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23.

При больших скольжениях ротора и поддержании в статоре асинхронного двигателя 20 номинального тока момент на валу двигателя мал и возрастает только при скольжениях, близких к номинальным. Напряжение на зажимах фаз статора при больших скольжениях также мало. Для компенсации пускового момента в предлагаемом устройстве предусмотрена цепь коррекции, состоящая из блока формирования средней амплитуды 13, блока нелинейного преобразования 12 и аналоговых умножителей напряжения 7, 8, 9 и повышающая уровень фазных токов статора асинхронного двигателя 20 при малых напряжениях на зажимах фаз статора умножением формируемых задающим генератором 10 токов на коэффициент, обратно пропорциональный амплитудным напряжениям фаз статора [5].

Однако для корректного выбора элементов устройства и его эффективной работы необходимо соблюдать принципы синтеза, реализуемые в приведенном ниже алгоритме, состоящем из трех основных блоков.

Первый блок основан на определении максимальных токов в обмотках статора асинхронного двигателя при наличии электрической несимметрии в цепи ротора. Данная величина токов необходима для подбора некоторых элементов устройства – трансформаторов тока, мостовых инверторов и др. Токи обмоток статора асинхронного двигателя для варианта межвиткового короткого замыкания в роторе определяются на основе модификации математической модели асинхронного двигателя, представленной в работе [6].

Второй блок предназначен для корректного выбора элементов устройства (рис. 1), поддерживающего эксплуатационный режим работы при наличии электрической несимметрии в цепи ротора.

Третий блок предназначен для оптимизации системы устройство–двигатель, осуществляемой на основе моделирования конкретных исследуемых режимов. На данном этапе главной задачей является подбор корректных коэффициентов усиления соответствующих функциональных блоков. Подбор выполняется итерационным методом, с отладкой модели на каждом шаге.

Устройство представляет собой симметричный трехфазный источник синусоидального тока с управлением амплитуды тока по режиму на механической характеристике: в режиме пуска источник должен обеспечить двигателю трех-пятикратный номинальный ток, а при переходе в рабочий режим с номинальным скольжением ток не должен превышать своего номинального значения.

Блоки 17–19 «преобразователи уровней» должны адаптировать фазное напряжение сети к напряжению управляющего устройства, не превышающему, как правило, 5 В, потому напряжение делится на некоторый коэффициент k .

Блоки 14–16 «пик-детекторы» фиксируют максимальное значение входного сигнала.

Блок 13 представляет собой сумматор максимальных за период значений фазных напряжений. Использование всех трех фаз для формирования напряжения обратной связи вызвано необходимостью сохранять работоспособность двигателя в случае значительной несимметрии напряжений.

Блок 12 «блок нелинейных преобразований» должен задавать уровень токов фаз двигателя таким образом, чтобы при максимальном уровне входного сигнала, соответствующем полному фазному напряжению, ток имел номинальное значение, а при скольжениях больше критического, когда напряжение мало, пусковой ток задавался большими величинами, порядка трехкратного номинального значения.

Блок 12 формирует сигнал, пропорциональный необходимым для соответствующего режима амплитудам токов фаз двигателя.

Задающий генератор напряжения 10 формирует синусоидальный сигнал условно единичной амплитуды, по которому будут формироваться мгновенные значения токов фаз путем перемножения в блоках «аналоговый умножитель напряжения» 7, 8, 9.

Трансформаторы тока 1, 2, 3 формируют сигналы, пропорциональные токам фаз, необходимые для установления обратной связи блоками 4, 5, 6. При несоответствии реальных токов фаз разность между сигналами, снимаемыми с трансформаторов тока, и сигналами задатчика, т.е. сигналами с аналоговых умножителей напряжения (7, 8, 9) подается на блоки мостовых инверторов 21, 22, 23 для нивелирования различия между токами требуемыми и реальными.

Следует отметить, что наиболее трудоемкой частью алгоритма является третий блок, поскольку при реализации метода последовательных приближений число циклов может быть различным.

2. Моделирование системы устройство–двигатель на примере короткого замыкания в роторе асинхронного двигателя

В качестве объекта исследования выступает высоковольтный асинхронный электродвигатель с фазным ротором 4ФАЗ-800/6000У2,5 с синхронной частотой вращения 750 об/мин производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО.

С использованием программного пакета MatLab Simulink реализовано моделирование системы устройство–двигатель при несимметрии электрических сопротивлений в цепи ротора. Структурная схема моделируемой системы представлена на рис. 2.

Рис. 2 – Структурная схема системы устройство–двигатель

Fig. 2 – Structure diagram of a device-motor system

Характеристики двигателя в функции времени, полученные при моделировании, показаны на рис. 3–5.

Рис. 3 – Токи фаз обмотки статора при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 3 – Time-function currents of stator phases at rotor asymmetry and stator currents forced set up

Рис. 4 – Токи фаз обмотки ротора при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 4 – Time-function currents of rotor phases at rotor asymmetry and stator currents forced set up

Рис. 5 – Угловая частота вращения ротора и электромагнитный момент при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 5 – Time-function rotor angular frequency and electromagnetic torque at rotor asymmetry and stator currents forced set up

3. Обсуждение результатов

Как показывают массивы расчетных данных отрезка двигателей типа 4ФАЗ, при появлении электрической несимметрии обмотки ротора неминуемо возникает провал электромагнитного момента. Величина провала зависит от различных факторов, таких как уровень несимметрии, величина механической нагрузки, тип нагрузки и др.

Результаты моделирования работы несимметричного двигателя при принудительном задании токов статора, реализуемом посредством разработанного устройства, показали эффективность решения задачи компенсации возникающего провала момента асинхронного двигателя. Цепь коррекции напряжения при больших скользящих обеспечивает увеличение токов статора в пусковом режиме до уровня, необходимого для создания требуемого пускового момента.

Стоит отметить, что важной и наиболее трудоемкой задачей при оптимизации системы является подбор коэффициентов усиления соответствующих блоков структурной схемы для реализации эффективной работы системы в целом.

В приводах ответственных установок, где технологическим процессом не допускается остановок в рабочем цикле, с целью устранения данного провала момента целесообразно использовать предлагаемое устройство.

Заключение

Для решения задачи разработки устройства выделены критерии синтеза, позволяющие обеспечить эффективную компенсацию провала механического момента двигателя, обусловленную наличием электрической несимметрии в обмотке ротора:

- расчет величины максимальных токов в обмотке статора в режиме несимметрии со стороны ротора;

- корректный выбор элементов устройства по рассчитанным токам;
- оптимизация системы устройство–двигатель.

Для асинхронного двигателя типа 4ФАЗ-800/6000У2,5 рассмотрен вариант работы системы устройство–двигатель при неравенстве активных сопротивлений фаз обмотки ротора. Получена осциллограмма токового сигнала, подаваемого устройством в обмотки фаз статора электродвигателя, подавляющего токи, наведенные полем обратной последовательности ротора. По полученной механической характеристике можно сделать вывод об эффективном решении устройством задачи устранения провала электромагнитного момента при наличии электрической несимметрии обмотки ротора, что предоставляет возможность довести технологическую операцию до завершения без необходимости немедленного отключения двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
4. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 1. – С. 72–78.
5. Патент 2647882 Российская Федерация. Устройство питания асинхронного двигателя / Е.О. Лавренов. – № 2016106441; заявл. 24.02.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
6. Лавренов Е.О., Тюков В.А. Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 7–12.

SYNTHESIS OF THE DEVICE SUPPORTING THE OPERATION MODE OF AN INDUCTION MOTOR UNDER ASYMMETRY OF A ROTOR WINDING

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S., Temlyakov A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The paper is devoted to the problem of electrical asymmetry of induction motors. The research object is an induction motor used to drive responsible mechanisms. The motor shutdown at the appearance of asymmetry during the operation of such engines is exceptionally undesirable. It is revealed that the source of a mechanical moment dip under rotor asymmetry is parasite currents induced by the rotor negative sequence field. To minimize these currents, a method of stator current forced setting is selected. The operation principle of the developed device with the function of removing a torque dip under rotor electrical asymmetry is considered. With aim of correct selection of the device elements and its effective work, an algorithm consisting of three blocks is constructed. The first block is calculation of maximum stator currents in the presence of rotor circuit asymmetry, the second block is selection of device elements by the currents found and the third block is optimization of a device-motor system. As a demonstration of the proposed device, a device-engine system was simulated in the presence of rotor resistance asymmetry and the verification of the results was performed. The efficiency of the device for solving the problem of compensating an electromagnetic torque dip caused by the asymmetry of the rotor circuit of an induction motor is pointed out.

Keywords: induction motor, turn-to-turn short circuit, mathematical modeling, electrical asymmetry.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56

REFERENCES

1. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p.
2. Vazhnov A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 256 p.
3. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 744 p.
4. Lavrenov E.O. Metody kompensatsii vliyaniya elektricheskoi nesimmetrii na mekhanicheskii moment induktsionnogo dvigatelya [Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 72–78.
5. Lavrenov E.O. *Ustroystvo pitaniya asinkhronnogo dvigatelya* [Power supply of asynchronous motor]. Patent RF, no. 2647882, 2017.
6. 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).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лавренов Евгений Олегович – получил степень бакалавра и магистра техники и технологии в Новосибирском государственном техническом университете в 2011 и 2013 г. 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 Evgenii Olegovich received B.S. and M.S. degrees from the Novosibirsk State Technical University in 2011 and 2013, respectively. He is currently a postgraduate student of the Electromechanics Department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are in the area of induction motor operation, fault diagnostics and detection using mathematical modeling. He is author of 25 scientific papers. (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. Email: temlyakova@corp.nstu.ru).

Temlyakova Zoya Savel'evna – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Electromechanics department of Novosibirsk State Technical University since 2003. She graduated from NSTU in 1971. In 2000, she defended her doctoral dissertation on “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 – a student at the Mechatronics and Automation Faculty, NSTU. The field of training is power and electrical 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 Reference:

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S. Temlyakov A.A. Printsipy sintezirovaniya ustroystva, podderzhivayushchego ekspluatatsionnyi rezhim dvigatelya pri nesimmetrii obmotki rotora [Synthesis of the device supporting the operation mode of an induction motor under asymmetry of a rotor winding]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp.48–56. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56.