

Старинский Н. И., Гуляев А. В., Фокин Д. С.
N. I. Starinsky, A. V. Gulyaev, D. S. Fokin

**РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ПО ПОИСКУ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ
ДЛЯ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР
НАПРЯЖЕНИЯ**

**DEVELOPMENT OF A REGULATOR TO FIND THE OPTIMAL FREQUENCY
FOR THE ASYNCHRONOUS MOTOR – AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER SYSTEM**

Старинский Никита Игоревич – магистрант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(962)677-59-60. E-mail: starii0612.n@gmail.com.

Nikita I. Starinsky – Master's Degree Student, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk); tel. 8(962)677-59-60. E-mail: starii0612.n@gmail.com.

Гуляев Александр Викторович – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: 89143127984@ya.ru.

Alexander V. Gulyaev – Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk). E-mail: 89143127984@ya.ru.

Фокин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Dmitry S. Fokin – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk).

Аннотация. В работе рассмотрена проблема низкой энергоэффективности при эксплуатации асинхронного двигателя (АД) и автономного инвертора напряжения. Причиной низкой энергоэффективности является наличие высших гармоник напряжения и тока, связанных с присутствием в частотном преобразователе нелинейных элементов. Целью данной работы является разработка такого алгоритма управления автономным инвертором напряжения, который будет учитывать как потери в двигателе, так и потери в инверторе от несущей частоты при генерации синусоидального сигнала посредством ШИМ. Была разработана имитационная модель системы АИН-АД в MATLAB Simulink с различными алгоритмами управления, получены графические зависимости искажений тока статора двигателя, потери в двигателе и потери в инверторе на коммутацию транзисторов от несущей частоты ШИМ при различных нагрузках двигателя. Как результат была получена функция показателя качества системы АИН-АД и разработана система экстремального управления в соответствии с данной функцией. Разработанный экстремальный регулятор осуществляет поиск точки экстремума, соответствующей минимуму искажений, регламентированных нормативно-технической документацией, а также определяет оптимальный режим работы инвертора при разных режимах работы электрической машины. Предложенные в работе алгоритмы позволяют без изменения топологии системы АИН-АД, которые в свою очередь приводят к удорожанию установки и дополнительным тратам, уменьшить уровень искажения тока статора АД и улучшить её энергоэффективность.

Summary. The paper considers the problem of low energy efficiency in the operation of an asynchronous motor and an autonomous frequency inverter, the reason for this is the presence of higher voltage and current harmonics associated with the presence of nonlinear elements in the frequency converter. The purpose of this work is to develop such algorithms for controlling an autonomous voltage inverter, which in turn took into account both losses in the motor and losses in the inverter from the carrier frequency of the PWM signal. A simulation model of the AVI-AM system in MATLAB Simulink with various control algorithms was developed, graphical dependences of motor stator current distortions, motor losses and inverter losses for switching transistors from the PWM carrier frequency at various motor loads were obtained. As a result, a system quality indicator was obtained and an extreme regulator of this function was developed, the found extreme point corresponds to a minimum of distortions regulated by regulatory and technical documentation, and also determines the optimal operating mode of the engine and inverter under a given machine load. The algorithms proposed in the work allow, without changing the topolo-

gy of the AVI-AD system, which in turn lead to an increase in the cost of the installation and additional costs, to reduce the level of distortion, and consequently improve its energy efficiency.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, коэффициент искажения кривой тока, широтно-импульсная модуляция, самонастраиваемый регулятор, экстремальный регулятор, энергоэффективность.

Key words: asynchronous motor, autonomous voltage inverter, current curve distortion factor, pulse-width modulation, self-adjusting regulator, extreme regulator, energy efficiency.

УДК 621.316.13

Современные регулируемые электроприводы с асинхронными двигателями (АД) обычно комплектуются автономными инверторами напряжения. Эти инверторы осуществляют модуляцию напряжения статора, что приводит к искажению формы питающего напряжения. Это искажение, в свою очередь, приводит к формированию несинусоидальных токов, что порождает пульсации их средних значений. Это влияет на производительность двигателя, вызывая потери энергии и ухудшение его перегрузочной способности (снижение КПД). Изменение формы синусоиды тока статора асинхронного двигателя определяется показателем гармонических искажений (THD_i) [1], который вычисляется на основе специальной формулы, приведённой в ГОСТ 30804.4.7-2013 [2].

В научных публикациях [1; 3] приводятся решения, связанные с изменением в топологии самого инвертора в системе автономного инвертора напряжения и асинхронного двигателя, для уменьшения уровня искажения тока высшими гармониками, однако эти решения приводят к усложнению и удорожанию системы и дополнительным финансовым тратам. Ещё одним из предложенных в литературе решений является увеличение несущей частоты ШИМ сигнала, но данный метод приводит к потерям на коммутацию транзисторов непосредственно в самом инверторе [1].

Повышения синусоидальности. Как известно, форма тока нагрузки автономного инвертора напряжения (АИН) непосредственно связана с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тем, что ШИМ используется для формирования синуса тока статора АД, а его частота влияет на синусоидальность. С увеличением несущей частоты ШИМ $f_{нес}$ коэффициент искажения тока уменьшается и представляет собой гиперболическую функцию $THD_i(f_{нес})$. Из руководства по устройству электроустановок [4; 5; 6] при значениях $THD_i \leq 10\%$ исключается риск неисправностей, связанных с повышенной температурой, что требует перехода на кабели большего сечения и более мощные источники питания. Графики зависимости $THD_i(f)$, которые представляют вид гиперболы, были получены для нагрузок двигателя 161 и 220 Нм и приведены на рис. 1. Важно отметить, что точки пересечения графика зависимости $THD_i(f)$ с линией ограничения искажений ($THD_i \leq 10\%$) будут варьироваться по несущей частоте при изменении нагрузки на валу двигателя. Описанное указывает на необходимость создания регулятора, который автоматически будет подстраивать частоту в системе при изменении нагрузки.

Регулятор функции от одного аргумента. Рассмотрим принцип определения оптимальной частоты. Процесс определения этого значения частоты, при которой $THD_i(f_{опт}) \leq 10\%$, происходит по циклическому типу с дискретным шагом поиска и начинается после окончания переходного процесса (по разгону асинхронного двигателя). На первом шаге поиска сравнивается текущее значение $THD_i(f_1)$ со значением $THD_{iуст} = 10\%$, если сравниваемое значение оказалось выше установочного, то вычисляется их приращение ΔTHD_i из разности текущего значения $THD_i(f_1)$ и значения $THD_{iуст}$:

$$\Delta THD_i(f_k) = THD_i(f_k) - THD_{iуст}, \quad (1)$$

где k – порядковый номер шага поиска. И в зависимости от знака полученной разности (1) определяется направление поиска частоты f_k : если $\Delta THD_i > 0$, регулятор следует в направлении увеличения значения параметра f_k по оси абсцисс (см. рис. 1), иначе, при $\Delta THD_i < 0$, регулятор следует в

направлении уменьшения значения параметра f_k вдоль оси абсцисс. Далее полученное приращение сравнивается с числом формирования шага δ , и в зависимости от результатов сравнения выбирается фиксированный шаг увеличения частоты Δf .

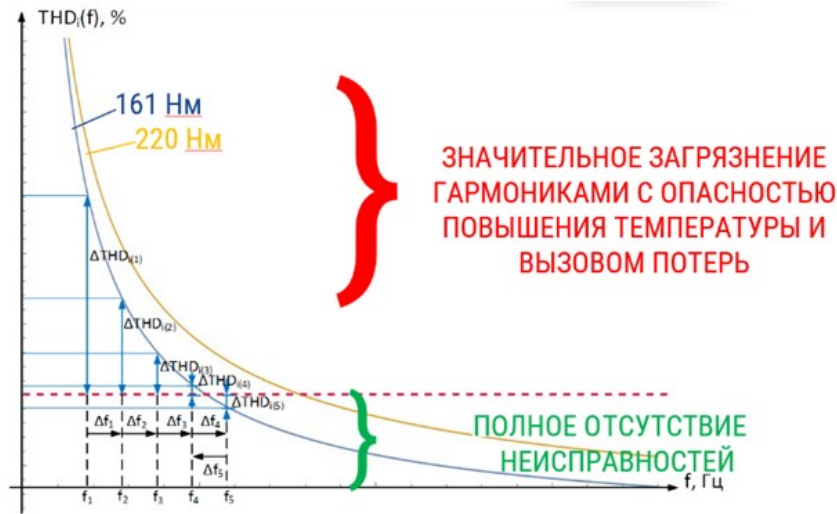


Рис. 1. Графики зависимости $THD_i(f)$ при различной нагрузке

Стоит отметить, что от частоты ШИМ сигнала изменяется не только коэффициент искажения кривой тока $THD_i(f)$, но и потери в инверторе на коммутацию транзисторов $W(f)$. На основании функциональных зависимостей уровня искажений $THD_i(f)$ и потерь в инверторе $W(f)$, представляющих собой нелинейно возрастающие функции от частоты, приведённых в [1], можно выдвинуть гипотезу, что точка пересечения двух этих функций является оптимальной, т. е. соответствует минимуму потерь мощности в системе АИН-АД [7].

Для проверки данной гипотезы требуется выполнить расчёт мощности потерь при реализации АИН ключевого режима работы IGBT транзисторов, циклически принимающих статические и динамические состояния. В любом из этих состояний возникают рассеивания мощности и энергии, которые нагревают полупроводники и увеличивают общие потери мощности в инверторе [8]:

$$P_{totM} = n \cdot (P_{totT} + P_{totD});$$

$$P_{totM} = n \cdot \left((E_{onT} + E_{offT} + E_{onD}) \cdot f_{sw} + u_{CE0} \cdot I_{cav} + r_c \cdot I_{crms}^2 + u_{D0} \cdot I_{Dav} + r_D \cdot I_{Drms}^2 \right);$$

$$P_{totM} = n \cdot \left((E_{onT} + E_{offT} + E_{onD}) \cdot f_{sw} + u_{ce0} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) + r_c \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos\varphi}{3\pi} \right) + \right. \\ \left. + u_{D0} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) + r_D \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos\varphi}{3\pi} \right) \right),$$

где n – количество вентилях в модуле; P_{totT} – общие потери в IGBT транзисторах; P_{totD} – общие потери на диоде. Получаемый график имеет вид прямой, т. к. при неизменном напряжении линии постоянного тока и постоянных среднеквадратичных значениях переменного тока потери при переключении компонентов линейно зависят от частоты переключения, однако в случае высоких обратных напряжений (> 1 кВ) и/или при высоких рабочих температурах (≥ 150 °С) потери при блокировке могут приобретать важное значение и даже приводить к тепловому разгону из-за экспоненциально растущих обратных токов [8].

Простым совмещением графических зависимостей коэффициента искажения кривой тока статора двигателя и потерь в инверторе определение оптимальной точки по несущей частоте

ШИМ затруднено из-за того, что $THD_i(f)$ выражено в относительных единицах, а $W(f)$ – в размерных единицах.

Получение зависимостей потерь в двигателе от частоты. Для приведения потерь в двигателе и инверторе от одного аргумента (частоты ШИМ) к одним единицам измерения целесообразно использовать имитационную модель, которая показана на рис. 2 для асинхронного двигателя НВА-55 и позволяет получить зависимости потерь в двигателе от частоты при различной нагрузке (см. рис. 3).

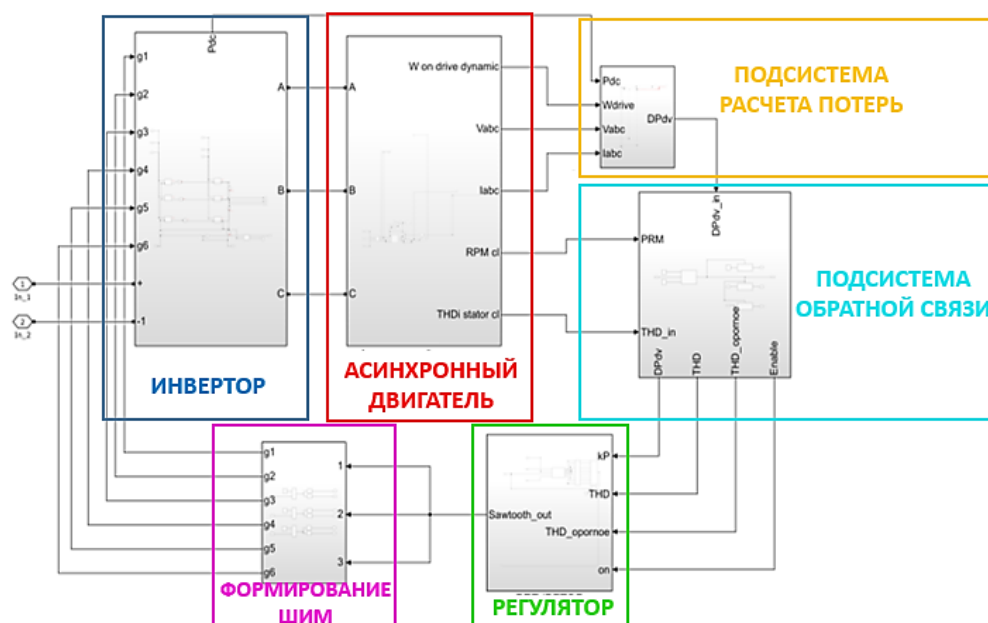


Рис. 2. Структурная схема системы «асинхронный двигатель – автономный инвертор напряжения» с реализуемыми алгоритмами управления в пакете MATLAB Simulink

Для удобства формализации полученных значений потерь произведём анализ полученных кривых $W_m = func(f)$ при нагрузках $M_{с1} = 161$ Нм и $M_{с2} = 220$ Нм, выполнив их степенную аппроксимацию:

$$W = af^{-b},$$

где a и b – коэффициенты степенного представления зависимости потерь в двигателе от частоты. В результате аппроксимации коэффициент детерминации $R^2 = 0,972$, что свидетельствует о достаточности использования данного представления. Данные аналитические зависимости были использованы в интерпретируемом языке функционального программирования системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica для построения графиков функций $W_{dv}(f)$ и $W(f)$. Таким образом, выявив функциональные зависимости потерь в АИН одновременно с потерями в АД, можем графически и аналитически наблюдать за динамикой потерь в данной системе в зависимости от частоты ШИМ. Однако, согласно объявленной гипотезе, ограничение процесса поиска до точки пересечения двух функций не позволит получить оптимальный режим работы системы. Связано это с тем, что гиперболические зависимости одновременно $THD_i(f)$ и $W_{dv}(f)$ при различной нагрузке смещаются вдоль оси ординат, следовательно, искомая точка пересечения графиков потерь также смещается вдоль оси абсцисс и будет находиться в области высоких частот. Поэтому модернизируем описанный ранее алгоритм регулятора поиска оптимальной частоты ШИМ модуляции до экстремального регулятора для поиска оптимальной точки по несущей частоте из условия экстремума рассматриваемых функций.

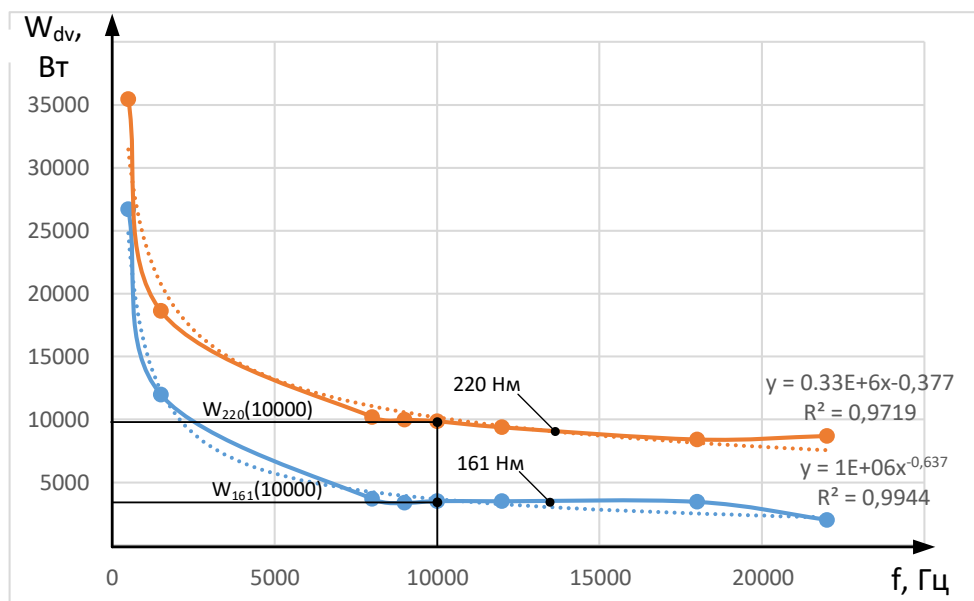


Рис. 3. Зависимости потерь в двигателе от частоты

Однако каждая из этих функций в отдельности не удовлетворяет необходимому условию экстремума [9], тем не менее их можно использовать для разработки системы экстремального регулирования как функции качества от одного аргумента – несущей частоты. Для такой реализации была получена функция качества системы, являющаяся суммарными потерями системы «АИН – АД» и удовлетворяющая необходимому условию экстремума функции (см. рис. 4). Таким образом, для реализации системы экстремального регулирования (СЭР), позволяющего определить оптимальную частоту ШИМ, была получена функция, имеющая локальный минимум и позволяющая определить минимум потерь мощности.

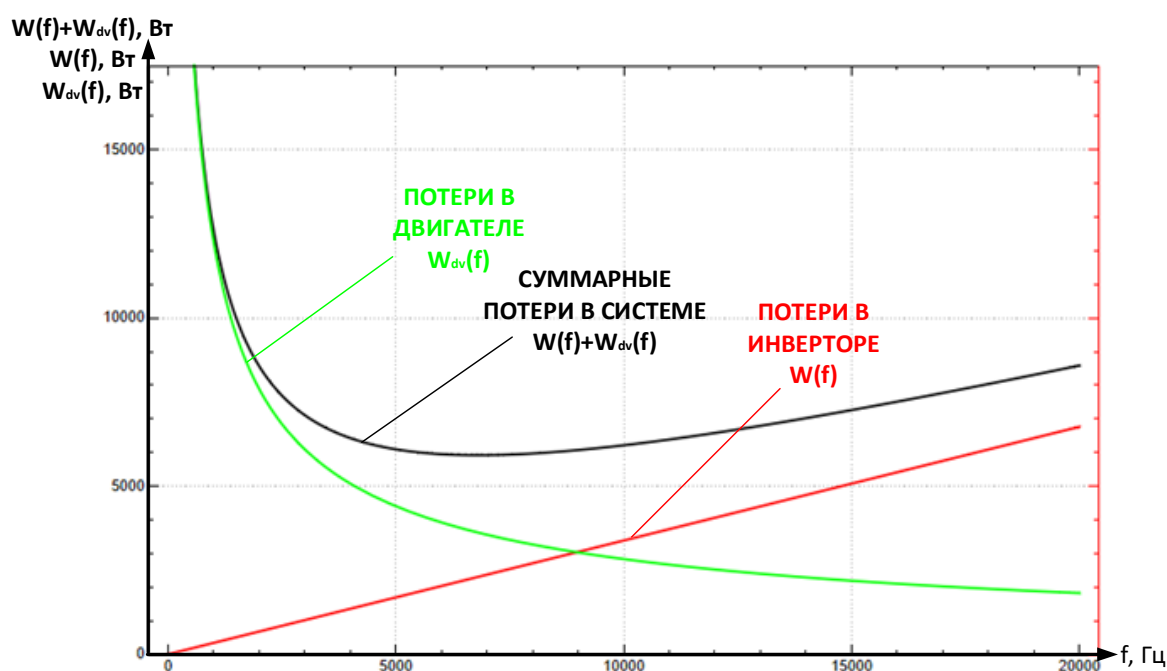


Рис. 4. Графические зависимости потерь в системе АИН-АД от частоты ШИМ

Классическая система экстремального управления. Главный отличительный признак экстремальной системы регулирования – это непрерывное автоматическое следование за значением входной величины, соответствующей экстремуму выходной в виде результата автоматического поиска [9].

Функциональная схема СЭР изображена на рис. 5.

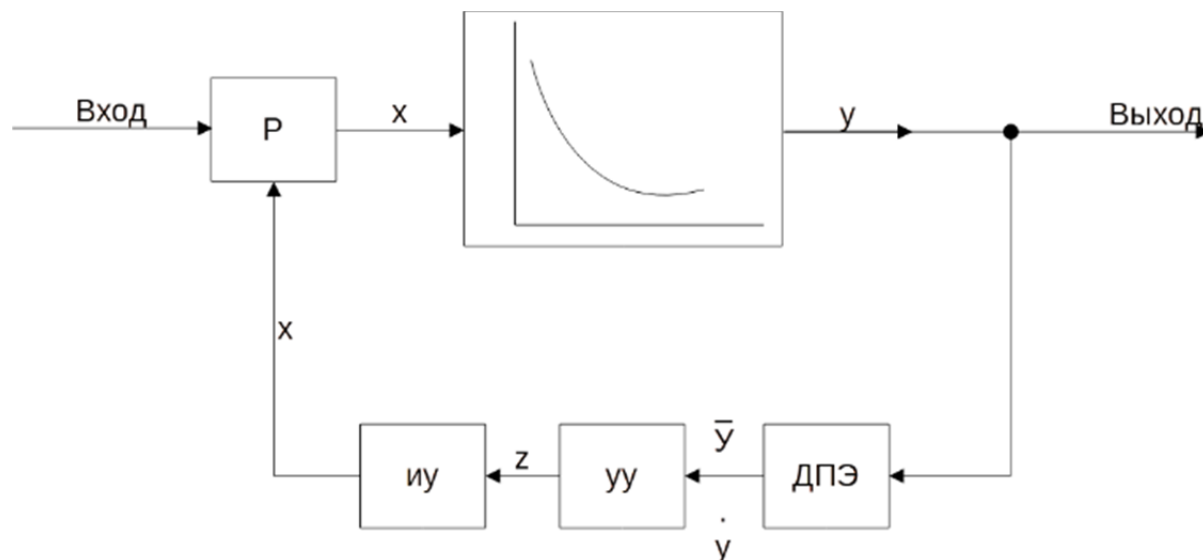


Рис. 5. Функциональная схема экстремального регулятора: Р – это регулирующий орган; ИУ – исполнительное устройство; УУ – управляющее устройство (осуществляет переключение направления сканирования); ДПЭ – датчик показателя экстремума (показывает положение системы относительно точки экстремума)

Датчик показателя экстремума использует два параметра: отклонение выходной величины y от отсчитываемого экстремального значения $\bar{y}$ или производную выходной величины по входной. Управляющее устройство определяет моменты переключения сканирования либо знак, либо величину сигнала автоматического поиска. Исполнительное устройство формирует сигнал поиска, вокруг которого совершаются колебания входной величины.

Система экстремального управления предназначена для нахождения минимума или максимума показателя качества объекта и поддержания этого показателя в экстремальных значениях [10]. В данном случае показателем качества выбраны суммарные потери в системе «асинхронный двигатель и автономный инвертор напряжения». В качестве управляющего воздействия на систему управления асинхронным двигателем выступает несущая частота ШИМ.

Имитационная модель. В соответствии с описанными ранее алгоритмами разработана имитационная модель схемы «асинхронный двигатель и автономный инвертор напряжения» с системой управления в среде MATLAB Simulink [11; 12] (см. рис. 2).

Схема состоит из инвертора напряжения, выполненного на IGBT транзисторах, имитационной модели двигателя НВА-55 с переключателем нагрузки, системы управления, состоящей из звена формирования ШИМ и регулятора с обратными связями по коэффициенту искажения кривой тока статора THD_{i_stator} , потерям мощности в инверторе P_{dc} и потерям в двигателе DP_{dv} .

На входы блока «Регулятор» поступают значения четырёх управляющих сигналов: контролируемого значения показателя качества системы kP , рассчитанного из потерь мощности в двигателе и потерь мощности в инверторе, текущего значения THD_i тока статора АД, опорного значения искажения кривой тока $THD_{i_опорное}$. Непосредственно работа самого блока регулятора осуществляется по описанным выше алгоритмам и программно реализована на языке Си при помощи встроенного редактора MATLAB. Результаты поиска частоты, при которой достигается экстремум функции показателя качества, приведены на рис. 6.

Из анализа этих рисунков видно, что точка минимума функций при нагрузке 161 Нм, что соответствует вентиляторной нагрузке вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К, достигается при частоте 6750 Гц, а при нагрузке 220 Нм (80 % от номинальной нагрузки двигателя НВА-55) потери будут минимальны при частоте 11500 Гц.

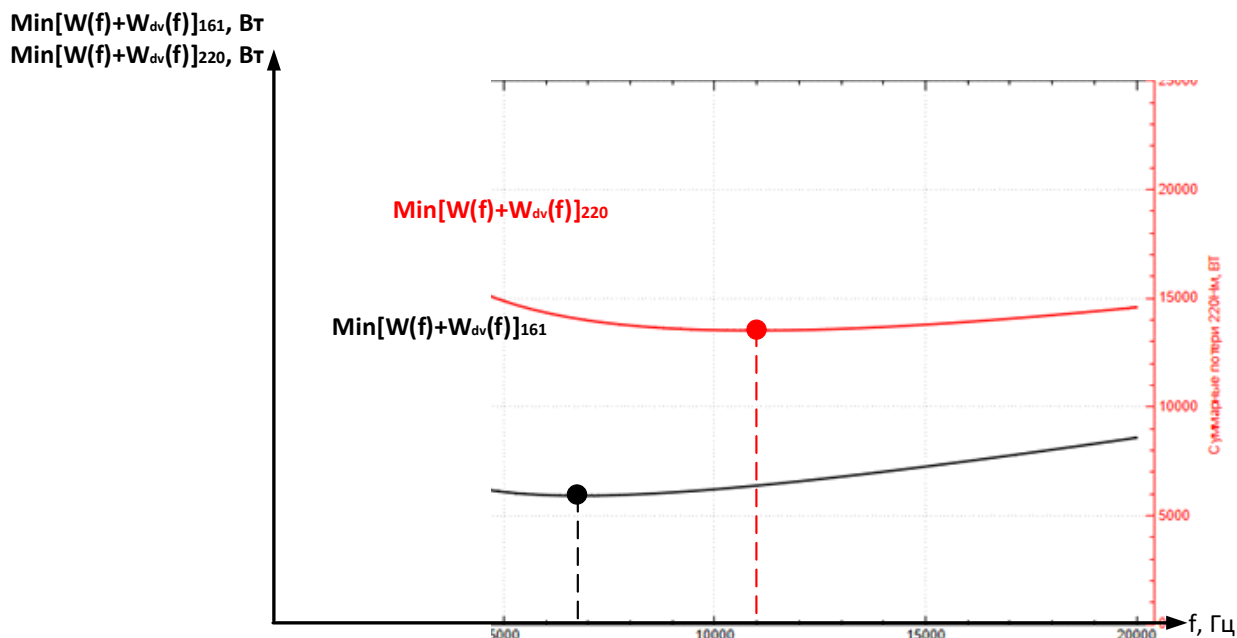


Рис. 6. Графики минимумов функций показателя качества

Далее определим, будут ли являться полученные точки минимумов показателя качества потерь в системе АД – АИН оптимальными и соответствовать необходимым значениям коэффициента искажения кривой тока. Для этого построим в одной координатной плоскости графики двух полученных ранее функций с соответствующими линиями минимума и ограничениями по параметру уровня искажений (см. рис. 7). Можно заметить, что окрестность полученной точки экстремума функции показателя качества системы, которая соответствует минимуму потерь в системе, находится ниже линии ограничения по коэффициенту искажения кривой тока статора АД. Следовательно, найденное регулятором значение несущей частоты ШИМ сигнала будет оптимальным не только по минимуму потерь в системе «АД – АИН», но и по уровню искажений.

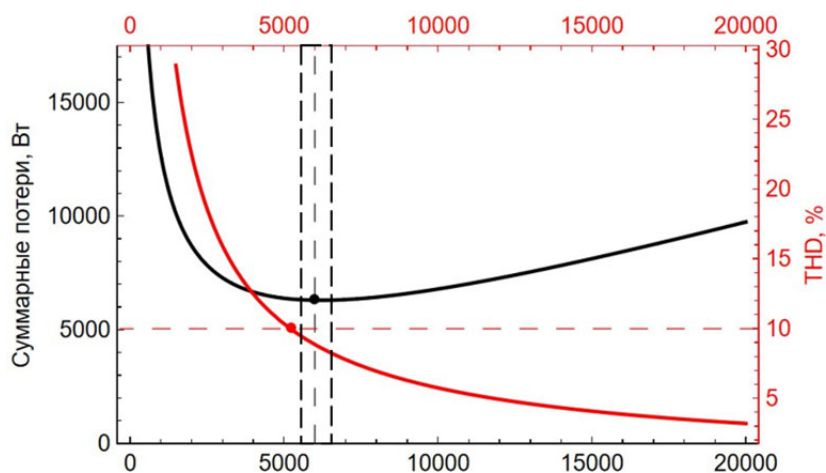


Рис. 7. Графические зависимости показателя качества и THD от частоты

Заключение. Разработана система автоматического поиска несущей частоты, при которой значение коэффициента искажения кривой тока статора асинхронного двигателя THD_i было меньше либо равно 10 %. Разработан метод приведения потерь в системе «АИН-АД» на коммутацию транзисторов АИН от частоты ШИМ к функции одного аргумента. Также создана система экстремального регулирования по полученной функции качества, что позволяет сократить потери в системе «АД-АИН» и тем самым повысить её энергетическую эффективность.

Эффективность разработанной экстремальной системы управления была проверена с помощью имитационного моделирования в программе Simulink. С помощью компьютерной модели были получены значения частоты, при которых потери в системе будут минимальны для АД НВА-55 с применением разработанной системы экстремального регулирования с нагрузкой 161 Нм. Например, при нагрузке 161 Нм и при фиксированной частоте 9 кГц суммарные потери в системе составили 6,6 кВт для классического способа, в то же время при найденной разработанным регулятором частоте 6750 Гц потери составили 6,2 кВт. Кроме того, найденная с помощью разработанного регулятора точка соответствует значениям коэффициента искажения кривой тока, которые будут ниже линии ограничения и связаны с наличием гармоник тока статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалык, Ю. С. Повышение энергоэффективности 3-фазного автономного инвертора напряжения / Ю. С. Кабалык // Электро. – 2015. – № 1. – С. 32-35.
2. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Общее руководство по средствам измерений и измерения гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств = Electromagnetic compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и внесён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 429-ст: введён впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр “САМТЭС”», Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. – М.: Стандартинформ, 2020. – 34 с.
3. Барегамян, Г. В. Выбор параметров LC-фильтра с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением / Г. В. Барегамян // Силовая электроника. – 2011. – № 1. – С. 50-56.
4. Руководство по устройству электроустановок – Schneider Electric. МКР-CAT-EL GUIDE-09, 12/2009. – 469 с.
5. IEEE Std 519-2014. Standard for harmonics: standard defines the voltage and current harmonics distortion criteria for the design of electrical systems. The existed voltage and current waveforms in every part of the system are explained in this standard, and the waveform distortion goals for the system designer are established. The standard is periodically updated as the industry evolves. Since its introduction in 1981, the standard has been updated several times and its latest edition is IEEE 519-2014. Some updates have been made by 2022 (see here). The main terms definitions and statistical evaluation technics are being covered within this current article, as the main changes that have been made in the standard were described in the IEEE-519 2014 edition.
6. ГОСТ 30804.3.12-2013. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний = Electromagnetic compatibility of technical equipment. Harmonic current emissions (equipment input current 16 A per phase). Limits and test methods: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и внесён Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 401-ст: введён впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр “САМТЭС”» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. – М. Стандартинформ, 2020. – 28 с.
7. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. М. Ишма-тов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

8. Application Manual Power Semiconductors Published by SEMIKRON International GmbH ISBN 978-3-938843-83-3 2nd revised edition ISLE Verlag 2015 © SEMIKRON International 2015.
9. Моросанов, И. С. Методы экстремального регулирования / И. С. Моросанов // Автоматика и телемеханика. – 1957. – Т. 18. – Вып. 11. – С. 1029-1044.
10. Шухарев, С. А. Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов / С. А. Шухарев, А. В. Гуляев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 68-77.
11. Терёхин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: учеб. пособие / В. Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. – 320 с.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.