

**ПРОБЛЕМА РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ
СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ**

Ключевые слова: электромеханотронная система, преобразователь частоты, звено постоянного тока, асинхронный двигатель.

Рассмотрены проблемы проектирования электромеханотронных систем с асинхронными двигателями. Предложены два этапа теоретического исследования данных систем. Приводятся результаты теоретического исследования электромеханотронной системы с асинхронным двигателем, позволившие выделить четыре характерных варианта соотношения угловой скорости асинхронного двигателя и угловой частоты пульсаций на выходе звена постоянного тока. Рассмотрены схемы замещения электромеханотронной системы и силовой части преобразователя частоты и асинхронного двигателя.

Keywords: electromechanotrone system, frequency converter, link of a direct current, asynchronous motor.

Problems of design of electromechanotrone systems with asynchronous motors are considered. Two stages of theoretical research of data of systems are offered. Results of theoretical research of electromechanotrone system with the asynchronous motor, allowed to allocate four characteristic options of a ratio of angular speed of the asynchronous motor and angular frequency of pulsations at the exit of a link of a direct current are given. Equivalent circuits of electromechanotrone system and power part of the converter of frequency and the asynchronous motor are considered.

В настоящее время в различных областях техники в качестве электроприводов широко используются электромеханотронные системы малой и средней мощности с асинхронными двигателями (ЭМТС с АД), структурная схема которых представлена на рисунке 1.

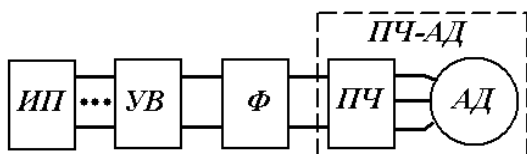


Рис. 1 – Структурная схема ЭМТС с АД: ИП – однофазный или трехфазный источник питания промышленной частоты; УВ – управляемый выпрямитель; Ф – фильтр, ПЧ – преобразователь частоты

Одной из особенностей данных систем является то, что они имеют в своем составе явно выраженное звено постоянного тока (ЗПТ), которое часто работает при значительных пульсациях выпрямленного напряжения. Это связано с тем, что по техническим, экономическим и другим причинам невозможно или нецелесообразно выполнить звено фильтра в ЗПТ с высоким значением коэффициента сглаживания. Кроме того, мощность ЭМТС часто соизмерима с мощностью источника питания, особенно при питании от бытовой сети. Поэтому параметры фильтра и выпрямителя оказывают существенное влияние на характеристики не только АД и всего привода в целом. Соответственно, разработка методов исследования, рассматривающих ЭМТС как единое целое, в конечном итоге позволит добиться рациональных технических и стоимостных характеристик при проектировании подобных систем [1-3].

В силу нелинейности ЭМТС их теоретическое исследование встречает определенные трудности и практически возможно только при принятии

определенных допущений. Однако анализ даже линейной ЭМТС представляет собой сложную теоретическую задачу, в частности из-за дискретного изменения структуры силовых цепей.

Поэтому исследование процессов в ЭМТС целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе провести предварительный теоретический анализ физики влияния низших временных гармоник на процесс электромеханического преобразования энергии в АД.

Напряжение на входе ЗПТ в общем случае представляет собой периодическую кривую, в составе которой можно выделить постоянную составляющую и переменную составляющую, частота которой определяется параметрами ИП и УВ. Поэтому фазные напряжения АД представляют собой амплитудно-модулированные колебания. При теоретических исследованиях модулированных колебаний в линейных электрических цепях принято разделять их на три независимых процесса, происходящих соответственно с несущей или основной частотой и двумя боковыми частотами: разностной и суммарной.

Анализ спектрального состава пульсирующего напряжения на входе ПЧ и фазных напряжений АД показывает, что в подавляющем большинстве случаев наибольшую амплитуду имеет первая гармоника, а влияние гармоник высших порядков незначительно и им можно пренебречь. При учете только первых гармоник фазные напряжения АД представляют собой сумму трех напряжений: несущей $\omega_{ад}$ – равной угловой частоте первой гармоники фазного напряжения АД, разностной $\omega_- = \omega_{ад} - \omega_{пул}$ и суммарной частоты $\omega_+ = \omega_{ад} + \omega_{пул}$ и имеют вид:

$$u_{abc}(t) = U_0 \left[\sin(\omega_{ад}t + \varphi_{abc}) + \frac{m}{2} \times \right. \\ \left. \times (\sin(\omega_{-}t + \varphi_{abc}) + \sin(\omega_{+}t + \varphi_{abc})) \right]$$

где $\omega_{пул}$ - угловая частота первой гармоники пульсаций, m - коэффициент модуляции.

Можно выделить четыре характерных варианта соотношения $\omega_{ад}$ и $\omega_{пул}$

1. $\omega_{ад} \gg \omega_{пул}$;
2. $\omega_{пул} < \omega_{ад} < 2\omega_{пул}$;
3. $\omega_{пул} \approx \omega_{ад}$;
4. $\omega_{пул} > \omega_{ад}$.

Частота вращения поля от системы напряжений суммарной частоты всегда выше по отношению к основной гармонике поля в воздушном зазоре. Соответственно, учет влияния поля, создаваемого в воздушном зазоре напряжением суммарной частоты ω_{+} , на характеристики АД аналогичен учету влияния высших временных гармоник. Трехфазная система напряжений разностной частоты создает в воздушном зазоре машины вращающееся поле, частота ω_{-} которого всегда меньше, чем частота поля от первой временной гармоники, т.е. она является по отношению к полю первой гармоники низшей временной. Поскольку индуктивные сопротивления АД на разностной частоте f_{-} меньше, чем при основной частоте f_1 , а амплитуда напряжения разностной частоты может достигать значительной величины, то в совокупности это может привести к заметному искажению кривой результирующего момента. Кроме того, в случае, когда $\omega_{пул} > \omega_{ад}$ напряжение разностной частоты создает поле, частота которого $\omega_{-} = \omega_{ад} - \omega_{пул} < 0$.

Применение теории модулированных колебаний позволяет использовать метод гармонического баланса при определении рабочих характеристик АД. На рисунке 2 показан пример влияния моментов, создаваемых полями низших временных гармоник на механическую характеристику АД мощностью 750 Вт при $f_{ад}$ равной 300, 400 и 500 Гц, $f_{пул} = 100$ Гц и неизменной глубине модуляции сигнала $m = 0,5$. Необходимо отметить, что в реальных схемах ЭМТС с АД глубина модуляции в существенной степени зависит от режима работы АД. Поэтому принятие её постоянной является достаточно существенным упрощением. Тем не менее, представленная механическая характеристика позволяет исследовать физическую сущность влияния низших временных гармоник на характеристики АД.

Задачей второго этапа является исследование процессов в ЭМТС методами, использующими мгновенные значения.

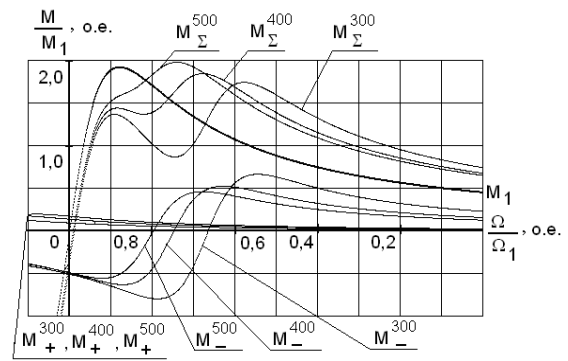


Рис. 2 – Результирующая механическая характеристика ЭМТС с АД 750 Вт: M_1 – механическая характеристика при отсутствии пульсаций, M_{Σ}^{500} , M_{Σ}^{400} и M_{Σ}^{300} – результирующие механические характеристики при частотах генерации 500, 400 и 300 Гц соответственно; M_{+}^{500} , M_{+}^{400} и M_{+}^{300} – моменты от напряжений суммарной частоты; M_{-}^{500} , M_{-}^{400} и M_{-}^{300} – моменты от напряжений разностной частоты

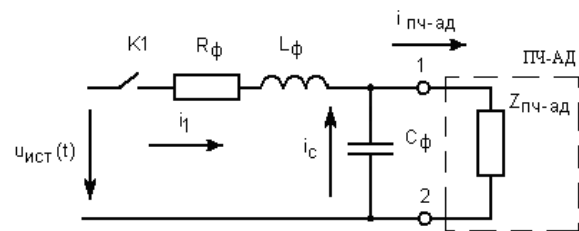


Рис. 3 – Схема замещения ЭМТС с АД: R_{ϕ} , L_{ϕ} и C_{ϕ} – соответственно активное сопротивление, индуктивность и емкость фильтра, $Z_{пч-ад}$ – комплексное сопротивление, характеризующее преобразователь частоты и асинхронный двигатель, $u_{ист}(t)$ – эквивалентный источник напряжения, соответствующий выходному напряжению выпрямителя.

Анализ элементов ЭМТС показывает, что данная система является сложной, нелинейной, вентильной цепью, работающей в режиме многократных переключений, и её весьма сложно исследовать аналитическими методами. Одним из способов, применяемым при анализе импульсных электрических цепей, является замена реальной схемы на идеализированную электрическую цепь, состоящую из небольшого числа простейших элементов: сопротивлений и коммутаторов, емкостей и индуктивностей, источников напряжения и тока [4]. Это позволит использовать схему замещения, представленную на рис. 3. Комплексное сопротивление $Z_{пч-ад}$ характеризует процесс электромагнитного преобразования энергии, проходящий в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД). Данное сопротивление, согласно теореме компенса-

ции, также может быть заменено эквивалентным источником $J_{пч-ад}$.

В свою очередь параметры $Z_{пч-ад}$ или $J_{пч-ад}$ определяются из схемы замещения силовой части ПЧ-АД (рис 4) и являются функцией входного напряжения ПЧ-АД.

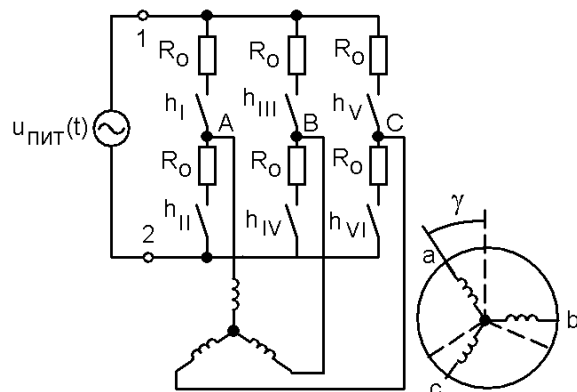


Рис. 4 - Схема замещения силовой части ПЧ-АД: $u_{пит}(t)$ – выходное напряжение ЗПТ, $h_I \div h_{VI}$ – коммутаторы трехфазного мостового инвертора; R_0 – активное сопротивление, учитывающее потери в силовых ключах преобразователя

Исследование данной цепи может быть осуществлено различными способами [5]. Например, можно выразить состояние ключей инвертора через их переключающие функции (ПФ) $h_I \div h_{VI}$.

Переключающие функции – это кусочно-непрерывные функции, при помощи которых выражается математическая связь между мгновенными значениями входных и выходных электрических величин вентильного преобразователя, что значительно упрощает дальнейшее исследование электромагнитных процессов в дискретных цепях.

В общем случае ПФ электрической цепи с периодическим изменением структуры для m -го интервала постоянства структуры (ИПС) схемы каждого периода можно записать при помощи единичных функций Хевисайта в виде:

$$F\{t\} = k \sum_{n=0}^{\infty} F(nT) [1\{t - nT\} - 1\{t - (n - \vartheta)T\}],$$

где $F(nT)$ – значение непрерывной входной функции в дискретный момент времени, $1\{t - nT\}$ – единичная функция Хевисайта начала m -го интервала, $1\{t - (n - \vartheta)T\}$ – единичная функция Хевисайта конца m -го интервала, ϑ – безразмерный коэффициент, характеризующий длительность импульса, k – коэффициент усиления импульса, T – период повторения импульса.

Выводы

1. Для исследования ЭМТС целесообразно одновременно с использованием ПФ применить ма-

тематический аппарат теории обобщенных функций (ТОФ). Использование математического аппарата ТОФ позволяет математически строго исследовать электромагнитные процессы в электрических цепях с дискретно меняющейся структурой, что в свою очередь позволит получить замкнутое аналитическое решение для фазных токов при высокой точности полученных результатов. Применение ТОФ для исследования ЭМТС с АД сдерживается необходимостью учитывать особенности перехода от записи уравнений движения АД в фазных координатах и в пространстве непрерывных функций к записи тех же уравнений в пространстве обобщенных функций. Кроме этого, зачастую достаточно сложный вид конечных уравнений делает затруднительным дальнейшее аналитическое исследование.

2. Также целесообразно составить математическую модель ЭМТС путем расчета операторным методом переходного процесса, протекающего на каждом ИПС. Это позволит оценить достоинства и недостатки обоих методов исследования.

3. С целью упрощения математической модели ЭМТС целесообразно использовать комплексное вращающееся преобразование уравнений движения АД к осям +, -, 0 статора и f, b ротора, что значительно упростит решение уравнений электрического равновесия двигателя. Но при этом необходимо учитывать, что АД является частью ЭМТС, соответственно необходимо осуществить аналогичное преобразование для всех звеньев ЭМТС, предшествующих АД.

Литература

1. В. Г. Макаров, *Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения*, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 6, 79 – 93 (2011).
2. В. Г. Макаров, *Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода*, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 6, 109 – 120 (2011).
3. Н.Ф. Миляшов, А. М. Шаряпов, И.Г. Цвенгер, В. Г. Макаров, И.Р. Хайруллин, *Электромеханотронная система с высокоскоростным асинхронным двигателем*, Известия вузов. Проблемы энергетики, 5 – 6, 78 – 87 (2007).
4. В. Г. Макаров, *Анализ электромагнитных процессов в обобщенном статическом преобразователе электрической энергии*, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 20, 160 – 165 (2011).
5. В. Г. Макаров, *Применение теории графов к моделированию статических преобразователей электрической энергии*, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 16, 102 – 105 (2011).