

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ПО НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ. КОРРЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье изложены методы анализа динамических процессов в структурах, формирующих механический момент в асинхронных электродвигателях при частотном управлении. Впервые в передаточной функции формирователя момента учтены нелинейности механической характеристики асинхронного электродвигателя, которые выразились в зависимости этой функции от скольжения (отставании скорости вращения ротора от скорости вращения магнитного поля статора) и от частоты напряжения на статоре двигателя. Показано, как динамическая положительная обратная связь по току статора «линеаризует» асинхронный электропривод, не нарушая устойчивости переходных процессов. Данная работа является примером того, как исходная усложненная (но более точная!) интерпретация нелинейности позволила найти новое лучшее решение задачи управления сложным динамическим объектом.

**Ключевые слова:** электропривод переменного тока, математический анализ, динамическая нелинейность, частотная характеристика, динамическая коррекция, положительная обратная связь.

**Введение.** Повсеместное применение преобразователей частоты для управления асинхронными двигателями создает в последние годы впечатление отсутствия проблем в области автоматизированного электропривода (АЭП). Однако попытки углублённого изучения динамических характеристик таких электроприводов заставляют вернуться к изучению проблем управления нелинейными системами. АЭП с частотным управлением — это существенно нелинейная система, «главным» параметром, определяющим нелинейность которых, является переменная частота питающего напряжения. В отличие от стационарных нелинейностей систем регулирования, рассматриваемых в 80-е и 90-е годы XX столетия переменная частота в АЭП изменяет его частотную характеристику.

Переменная частота, строго говоря, не позволяет использовать математический аппарат, разработанный для приводов переменного тока, базирующийся на векторном анализе, т.к. векторное представление переменных во времени подразумевает постоянство частоты питающего напряжения, или частоты вращения этих векторов. Однако, за отсутствием другого, векторные методы используются в большинстве исследовательских или учебных работ, посвященных приводам переменного тока, несмотря на то, что авторы достаточно часто сознают неправоту такого подхода.

**Постановка задачи.** Наиболее эффективным инженерным методом оценки динамики электропри-

водов является метод частотного анализа. Прямое применение этого метода к асинхронным электроприводам затруднено наличием в них существенных нелинейностей.

Построение частотных характеристик таких систем сопряжено с рядом неизбежных допущений. После рассмотрения разных вариантов этих допущений наиболее приемлемым оказался предложенный в фундаментальной научной работе А. А. Булгакова [1] и получивший дальнейшее развитие в монографии А. А. Усольцева [2] расчет динамической механической характеристики.

Расчет отталкивается от формулы, в которой устанавливается связь между текущим моментом ( $m$ ) и скольжением ( $\beta$ ) на номинальной частоте  $\omega_{1ном}$ :

$$m = \frac{2M_k}{\left(1 + T_2' p\right) \left[ \frac{S_k}{\beta} \left(1 + T_2' p\right) \right] + \frac{\beta}{S_k}}, \quad (1)$$

где  $T_2' = \frac{L_k}{R_2}$  — переходная постоянная времени ротора;  $\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}$  — относительное скольжение;  $M_k$  — критический момент,  $S_k$  — критическое скольжение на номинальной частоте  $\omega_{1ном}$ .

В начале рабочей характеристики (при  $M \approx 0$ ,  $\beta \geq 0$ ) передаточная функция упрощается и сводится к динамическому звену 1-го порядка:

$$m = \frac{2M_k}{(1 + T_2' p) \frac{S_k}{\beta}} = \frac{2M_k \beta}{(1 + T_2' p) S_k} = \frac{2M_k (\omega_1 - \omega)}{(1 + T_2' p) S_k \omega_1}$$

При этом передаточная функция, связывающая абсолютное скольжение и развиваемый двигателем момент будет выглядеть следующим образом:

$$W_A(p) = \frac{m}{\Delta \omega} = \frac{2M_k}{(1 + T_2' p) S_k \omega_1} \quad (2)$$

Однако результаты экспериментов, приведенные в [3–6], показали, что распространять эту формулу на все рабочие режимы некорректно.

**Решение.** Уравнение (1) позволило предложить другой вариант линеаризации, при котором исходное уравнение примет вид:

$$m \left[ (T_2' p)^2 p^2 + 2T_2' p + 1 + \left( \frac{\beta}{S_k} \right)^2 \right] = \frac{2M_k}{S_k} \beta (1 + T_2' p), \quad (3)$$

Тогда уравнение, связывающее момент ( $m$ ), относительное скольжение ( $\beta$ ) и параметры двигателя ( $T_2'$  — переходная постоянная времени;  $M_k'$ ,  $S_k$  — критический момент и критическое скольжение, зависящие от частоты  $\omega_1$ ) примет вид:

$$m = \frac{2M_k (T_2' p + 1) S_k \beta}{(1 + T_2' p)^2 S_k^2 \beta^2}, \quad (4)$$

а передаточная функция, связывающая абсолютное скольжение и момент, примет вид:

$$W_A(p) = \frac{2M_k (T_2' p + 1) S_k}{\omega_1 [(1 + T_2' p)^2 S_k^2 + \beta^2]}, \quad (5)$$

где  $\omega_1$  — частота статорного напряжения

Структурная схема привода на рабочем участке примет вид, представленный на рис. 1.

Передаточная функция формирователя момента изменяется при изменении частоты статорного напряжения и скольжения, т.е. является существенно нелинейной.

Следует обратить внимание, что при  $\beta=0$  передаточная функция, как и структурная схема, в точности совпадают с линейной передаточной функцией и структурной схемой для асинхронного привода, приведенных в трудах А. А. Булгакова [1] и монографии А. А. Усольцева [2]. В предлагаемой нелинейной интерпретации формула и структурная схема объясняют часть проблем асинхронного электропривода. Для этого предлагается рассмотреть передаточные функции и соответствующие им частотные характеристики при «замороженных»,

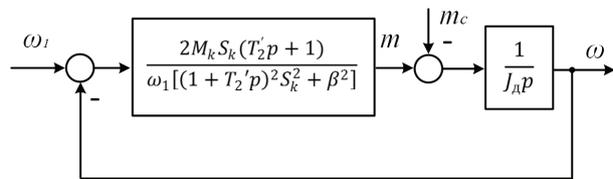


Рис. 1. Структурная схема АД на рабочем участке

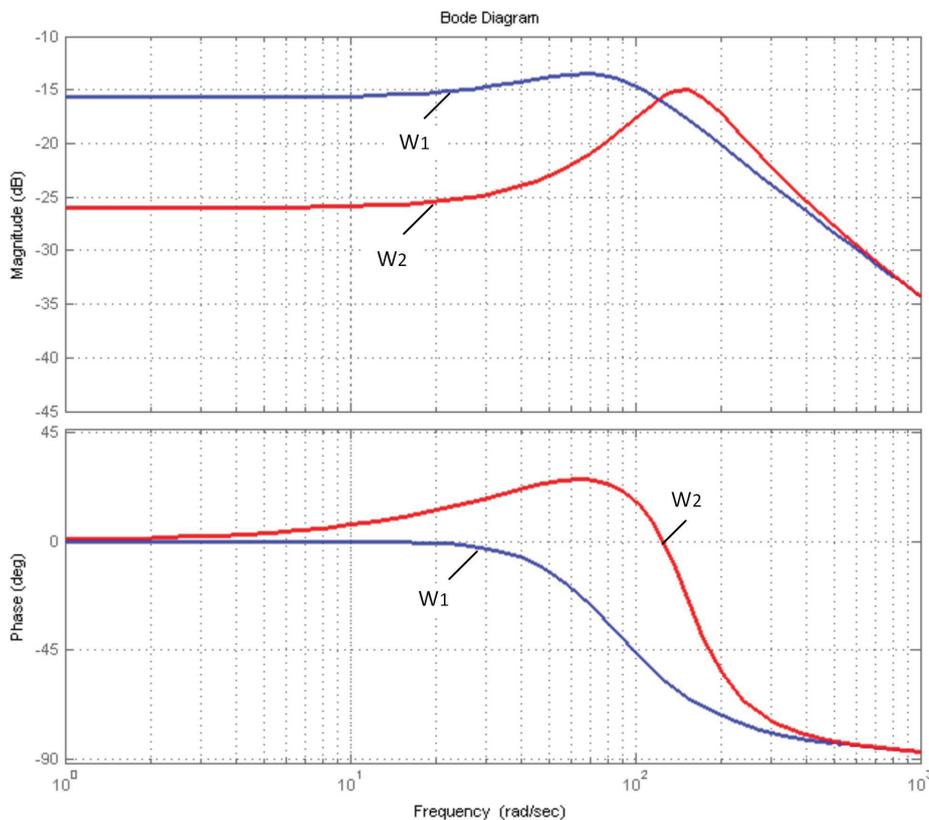


Рис. 2. Частотные характеристики электродвигателя при частоте статорного напряжения 10 Гц и скольжениях, соответствующих малой (W1) и номинальной (W2) нагрузкам

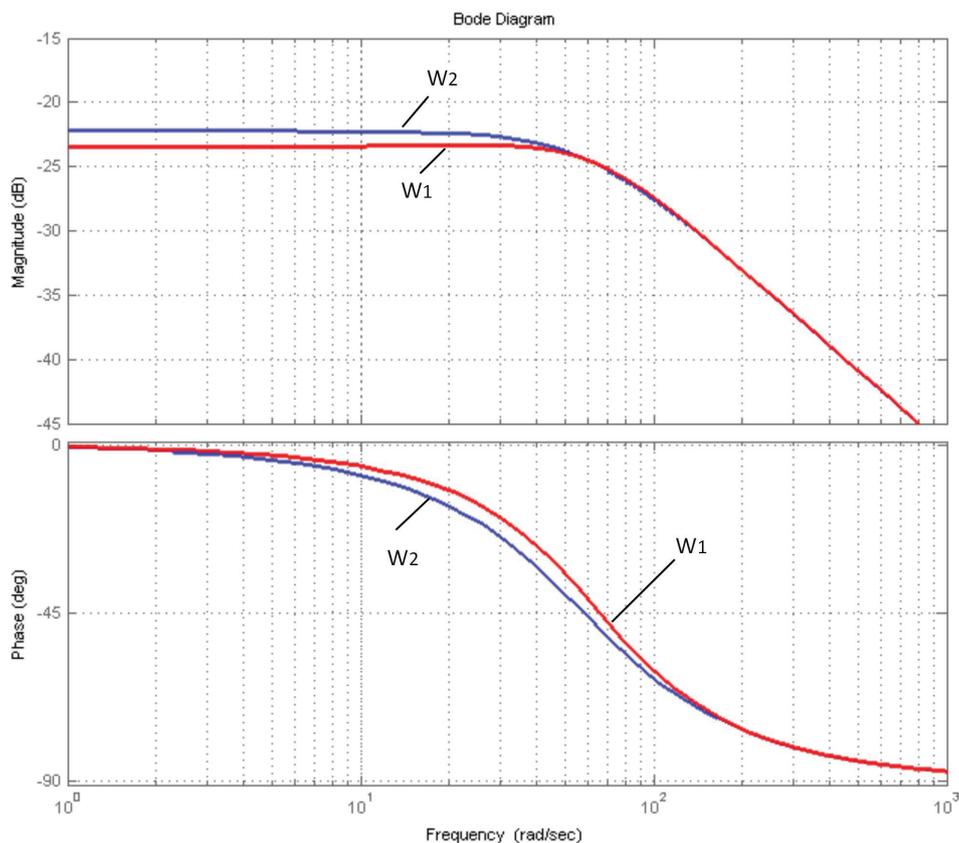


Рис. 3. Частотные характеристики электродвигателя при частоте статорного напряжения 50 Гц и скольжениях, соответствующих малой (W1) и номинальной (W2) нагрузкам

но разных значениях частоты статорного напряжения и скольжения. При этом вместо традиционных характеристик объекта управления необходимо будет рассматривать «семейства», сгруппированные по изменяющемуся напряжению статора (его частоте) или скольжению.

На рис. 2 и 3 приведены частотные характеристики асинхронного электропривода с частотным управлением на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором малой мощности, применяемым в исследовательском стенде. Они построены в приложении *Simulink* программной среды *MatLab* [7–10].

На рис. 2 приведены амплитудная и фазовая частотные характеристики электродвигателя при частоте статорного напряжения 10 Гц и скольжениях, соответствующих малой ( $0,2M_n$ ) и номинальной нагрузкам. На рис. 3 представлены аналогичные характеристики для частоты статорного напряжения 50 Гц.

Приведенные частотные характеристики хорошо объясняют некоторые проблемы АЭП. При работе на низких частотах статорного напряжения фазовые сдвиги при изменении нагрузки (и скольжения) существенно меняются, что приводит к неустойчивости и неэффективной работе на малых скоростях (рис. 2). Сопоставление частотных характеристик на частотах статорного напряжения 10 и 50 Гц показывает, что в диапазоне от 10 до 100  $\text{с}^{-1}$  фазовые сдвиги частотных характеристик имеют существенно разные значения — от +25 до -45 град. Т.е. при разгонах и торможениях фазовые сдвиги меняются таким образом, что система с запасом устойчивости на частоте статорного напряжения 50 Гц может стать неустойчивой на частоте статорного напряжения 10 Гц. Это может

быть причиной разной колебательности привода на разных частотах статорного напряжения, которые отмечались в [3, 4]. Таким образом, нелинейности передаточных функций звена формирователя момента (рис. 1) требуют линеаризации для повышения эффективности электропривода и одинакового поведения на разных частотах.

Одним из широко применяемых способов линеаризации являются различные виды так называемого «трансовекторного» управления. При этом управлении в управляющем устройстве формируются динамические звенья, обратные динамическим звеньям двигателя, адаптируемые к различным режимам работы. Поскольку в реальном приводе идеальная адаптация невозможна, передаточные функции, заложенные в программное обеспечение преобразователей частоты и реальных асинхронных двигателей, могут различаться по ряду причин (ряд параметров трудно измерить, структура реального электродвигателя значительно сложнее модели, некоторые параметры могут изменяться в процессе работы), а динамические звенья являются достаточно сложными (эквивалентные переда-

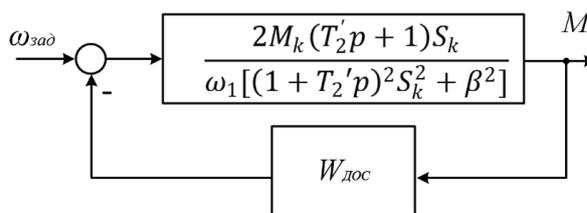


Рис. 4. Структурная схема АЭП с локальной обратной связью по электромагнитному моменту

Передаточные функции формирователя момента исходного АЭП  
и корректирующего звена

	*	$W_A(p)$	$W_{AOC}$
10 Гц	$\beta_1$	$\frac{0,038p + 0,226}{0,0002p^2 + 0,0229p + 1,38}$	$\frac{0,707}{0,0038p + 0,226}$
	$\beta_2$	$\frac{0,038p + 0,226}{0,0002p^2 + 0,0229p + 4,52}$	$\frac{3,84}{0,0038p + 0,226}$
50 Гц	$\beta_1$	$\frac{0,027p + 1,548}{0,006p^2 + 0,628p + 20,56}$	$\frac{0,141}{0,27p + 1,548}$
	$\beta_2$	$\frac{0,027p + 1,548}{0,006p^2 + 0,628p + 21,19}$	$\frac{0,77}{0,27p + 1,548}$

\* $\beta_1$  — соответствует скольжению при малой нагрузке,  $\beta_2$  — соответствует скольжению при номинальной нагрузке

точные функции ПЧ-АД могут в отдельных режимах содержать резонансные звенья, которые приводят к срывам управления, к гармоникам высокой частоты и к различиям в динамике на разных скоростях, которые отмечались в ходе экспериментов [3, 4].

Представляют несомненный интерес другие варианты линеаризации формирователя момента.

Рассмотрим вариант применения локальной обратной связи по электромагнитному моменту в данной структуре. Структурная схема приведена на рис. 4.

При этом передаточная функция формирователя момента примет вид:

$$W_{экр} = \frac{\frac{2M_k(T_2'p + 1)S_k}{\omega_1 \left[ (1 + T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2 \right]}}{1 + \frac{2M_k S_k (T_2'p + 1) W_{AOC}}{\omega_1 \left[ (1 + T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2 \right]}} = \frac{2M_k S_k (T_2'p + 1)}{\omega_1 \left[ (1 + T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2 \right] + 2M_k S_k (T_2'p + 1) W_{AOC}} \quad (6)$$

При выполнении следующего условия:

$$\omega_1 \beta^2 = -2M_k S_k (T_2'p + 1) W_{AOC}, \quad (7)$$

т.е. если корректирующее звено будет иметь следующую передаточную функцию

$$W_{AOC} = \frac{\omega_1 \beta^2}{2M_k S_k (T_2'p + 1)}, \quad (8)$$

то передаточная функция формирователя момента принимает вид:

$$W_{экр} \frac{2M_k S_k (T_2'p + 1)}{\omega_1 \left[ (1 + T_2'p)^2 S_k^2 \right]} = \frac{2M_k}{\omega_1 S_k (1 + T_2'p)}, \quad (9)$$

т.е. становится линейным звеном, не зависящим от скольжения (нагрузки) и полностью совпадающим с передаточной функцией, приведенной в монографии А. А. Усольцева [2] для малых нагрузок (2). Обратим внимание на формулу (8). Динамическое звено представляет собой инерционность первого порядка с коэффициентом, зависящим в конечном счете от частоты статорного напряжения и от абсолютного скольжения. Знак (-) перед формулой означает, что связь должна быть положительной. Назовем эту связь — динамическая положительная обратная связь (АОС+). Следует отметить, что коррекцию коэффициента от частоты реализовать очень легко в преобразователях частоты. Таким образом, предложенная положительная обратная связь, выбранная по условию (7), позволяет компенсировать действие внешней нагрузки и нелинейности асинхронного электропривода, распространив передаточную функцию двигателя как звена 1-го порядка для любых значений  $\beta$ . Кроме этого, структурная схема (см. рис. 1) и передаточная функция звена формирования момента (5), связывающие момент и скольжение, позволяют предложить оценку эффективности алгоритма формирования момента: более эффективным будет тот алгоритм, который сформирует необходимый момент при наименьшем абсолютном скольжении.

Далее рассмотрим коррекцию асинхронного электропривода при параметрах, соответствующих частотам питающего напряжения 10 и 50 Гц. Исходные частотные характеристики приведены на рис. 2, 3. Передаточные функции исходного АЭП при таких параметрах и передаточные функции корректирующих звеньев приведены в табл. 1. Частотные характеристики исходных и скорректированных АЭП приведены на рис. 5, 6 для частот питающего напряжения 10 и 50 Гц соответственно.

Как и предполагалось, частотные характеристики (ЧХ) АЭП с предлагаемой в работе структурной коррекцией близки к ЧХ линейного звена 1-го порядка.

В широко применяемых АЭП реализовать связь по механическому моменту весьма сложно.

Учитывая, что момент равен  $I_1 \Psi_2$  и практически во всех расчетах предполагается, что роторное потокоцепление постоянно, можно заменить исход-

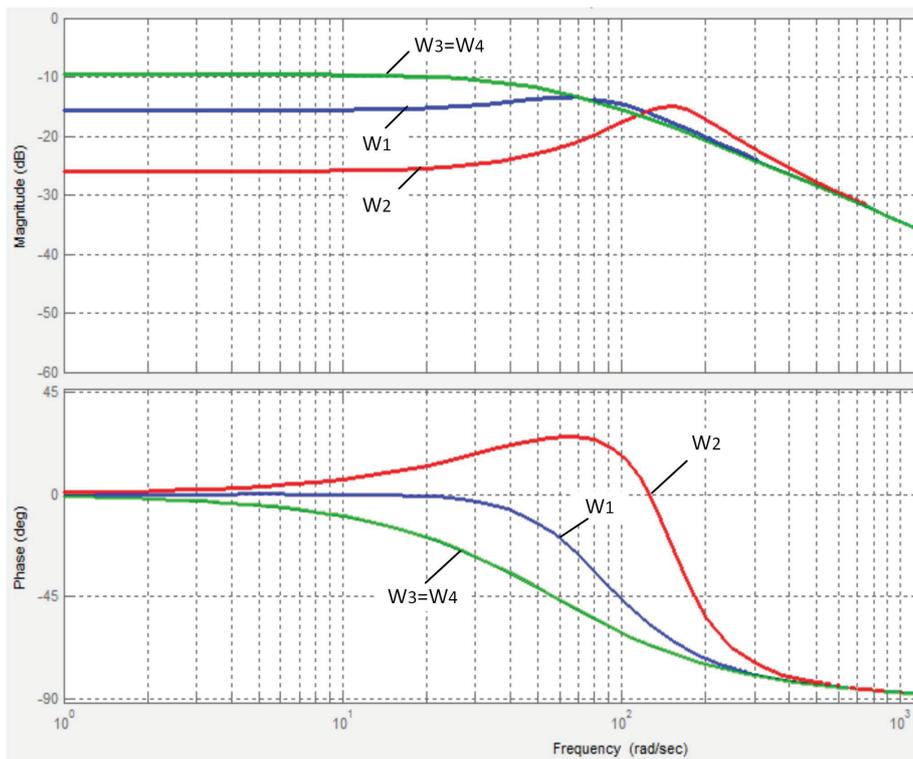


Рис. 5. Частотные характеристики звена формирования момента: исходные (W1, W2) и скорректированные (W3, W4) для частоты питающего напряжения 10 Гц

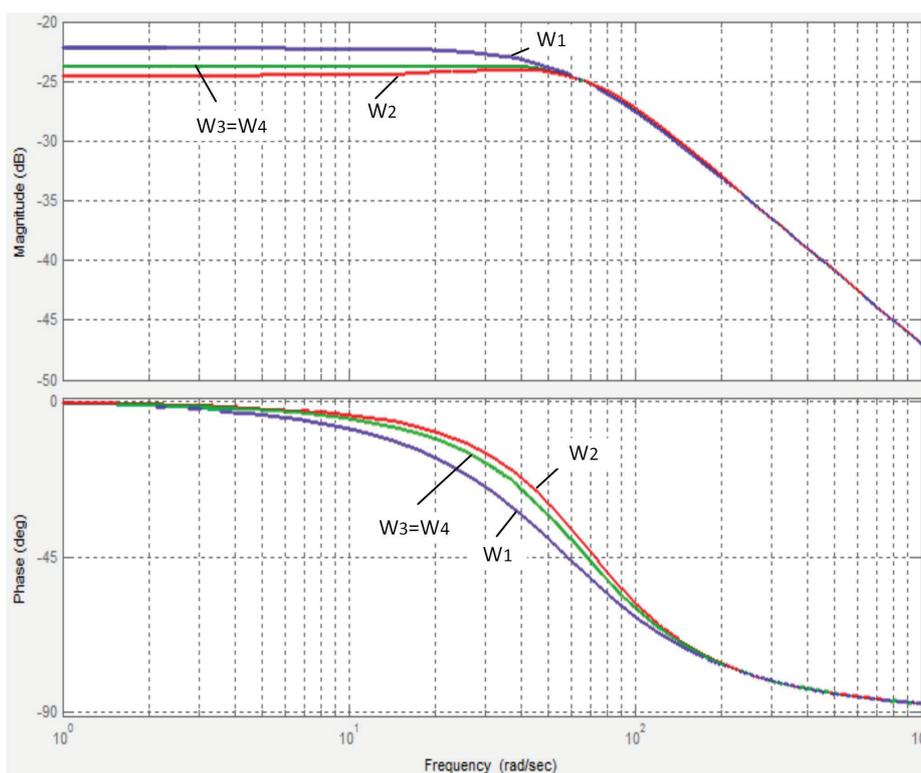


Рис. 6. Частотные характеристики звена формирования момента: исходные (W1, W2) и скорректированные (W3, W4) для частоты питающего напряжения 50 Гц

ный сигнал в этой локальной связи на действующее значение тока статора, или его активную составляющую, вычисление которого осуществляется во всех ПЧ.

Для связи с током статора условие линеаризации несколько изменятся:

$$\omega_1 \beta^2 = -2M_k S_k (T_2' p + 1) \frac{W_{AOC}}{\Psi_2}.$$

Это выражение показывает, что при контроле потокоцепления условия линеаризации могут

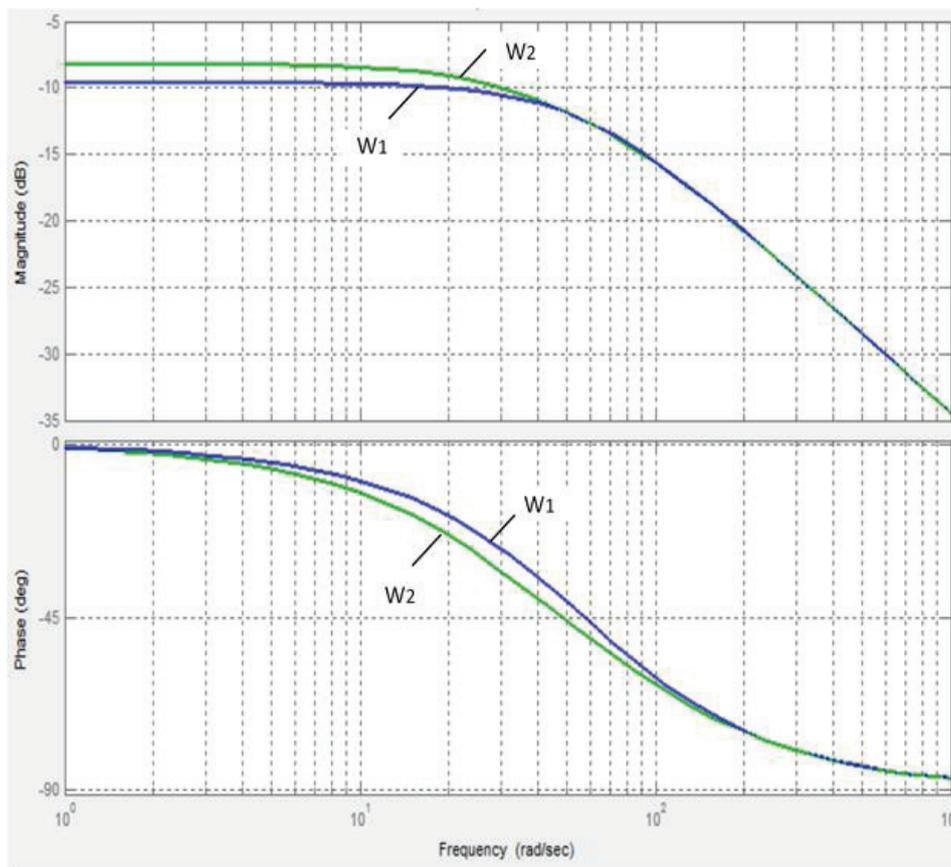


Рис. 7. Частотные характеристики формирователя момента и передаточные функции корректирующего звена для частоты статорного напряжения 10 Гц, точные (W1) и при отклонении коэффициента передачи корректирующего звена на 5 % (W2).

$$W_{Aoc1} = \frac{3,84}{0,0038p + 0,226}, \quad W_{Aoc2} = \frac{4}{0,0038p + 0,226}$$

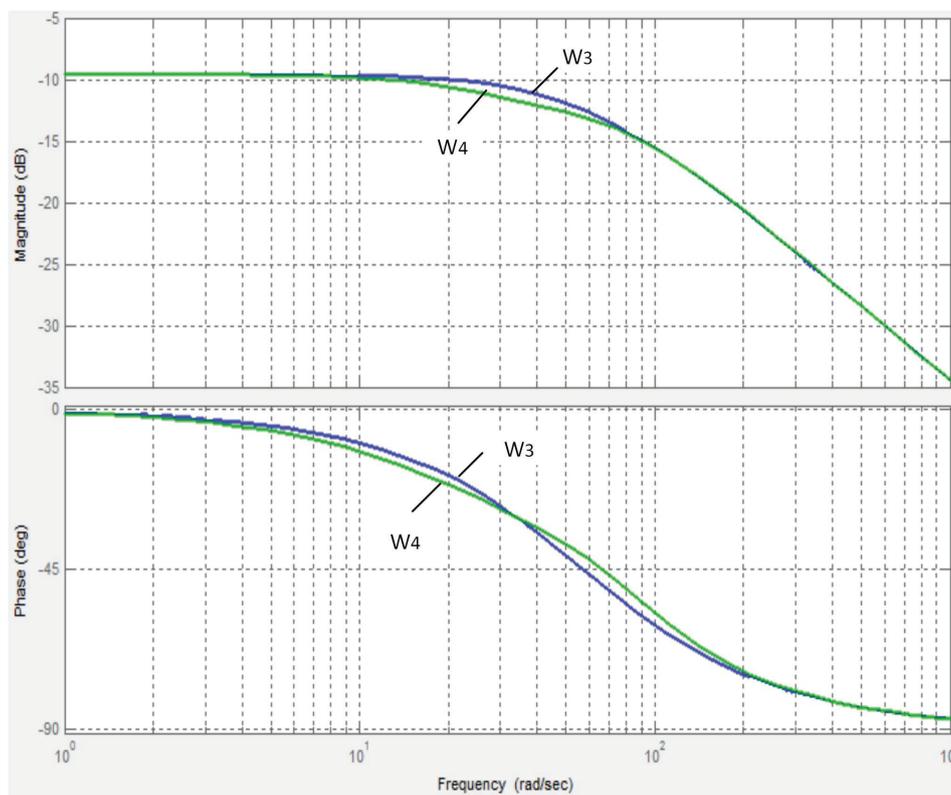


Рис. 8. Частотные характеристики формирователя момента и передаточные функции корректирующего звена для частоты статорного напряжения 10 Гц точные (W3) и при отклонении постоянной времени корректирующего звена на 5 % (W4),

$$W_{Aoc3} = \frac{3,84}{0,0038p + 0,226}, \quad W_{Aoc4} = \frac{3,84}{0,0042p + 0,226}$$

уточняются, обеспечивая тем самым высокое качество регулирования [11, 12].

С другой стороны, легко показать, что при некоторой неточности выполнения условия линеаризации, т.е.

$$\frac{\beta}{S_k} - \frac{2M_k(T_2'p + 1) \cdot W_1}{\Psi_2} \neq 0 = \Delta.$$

Передаточная функция (ПФ) и ЧХ формирователя момента будут незначительно отличаться от ПФ и ЧХ линейного звена первого порядка.

Рассмотрим случай отклонения параметров корректирующего звена на 5 % для частот питающего напряжения 10 и 50 Гц. Частотные характеристики звена формирователя момента с точной коррекцией ( $W_1$ ,  $W_2$ ) и отклонением коэффициента передачи корректирующего звена  $\pm 5\%$  ( $W_3$ ,  $W_4$ ) представлены на рис. 7, 8.

Ранее было показано, что при отклонении сигнала скорости вращения двигателя на 5 % векторное управление АЭП на некоторых скоростях «разваливается».

**Вывод.** Таким образом, предложенный метод анализа процессов в асинхронном приводе с частотным управлением по изменяющимся передаточным функциям и частотным характеристикам («семействам» функций и характеристик с замороженными параметрами частоты и скольжения) позволил предложить эффективную, с точки зрения управляемости нелинейной динамической структуры, коррекцию, позволяющую существенно повысить ее эффективность.

#### Библиографический список

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М.: Наука, 1966. 295 с.
2. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2000. 94 с.
3. Кодкин В. Л., Шмарин Я. А., Аникин А. С., Балденков А. А., Логинова Н. А. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й науч. конф. Челябинск, 2016. С. 805–814.
4. Аникин А. С., Кодкин В. Л., Балденков А. А. Динамическая положительная связь в асинхронных электроприводах с частотным управлением // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: материалы 8-й Междунар. науч. конф., Северный Чарльстон, Южная Каролина, США, 17–18 июня 2015. CreateSpace, 2015. С. 119–124. ISBN 978-1515019855.
5. Ещин Е. К. Управление электромагнитными моментами параллельно работающих асинхронных электродвигателей от одного инвертора // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 5 (63). С. 49–50.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: ACADEMIA, 2006. 267 с.
7. Perron M., Le-Huy H. Full Load Range Neural Network Efficiency Optimization of an Induction Motor with Vector

Control using Discontinuous PWM // 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2006. Vol. 1. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295586.

8. Le-Huy H. Modeling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset // IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2011. Vol. 3. DOI: 10.1109/IECON.2001.975530.

9. Le-Huy H., Sybille G. MATLAB/Simulink and PSpice as modelling tools for power systems and power electronics // 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. 2000. Vol. 2. 766–767. DOI: 10.1109/PSS.2000.867449.

10. Dessaint Louis-A., Champagne R. Real-time simulation of electric drives // Mathematics and Computers in Simulation. 2003. Vol. 63 (3-5). P. 173–181. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00065-X.

11. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Positive Dynamic Feedback on Stator Current // III International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Proceedings. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076179.

12. Пат. 2599529 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 23/02, Н 02 Р 25/02. Устройство частотного управления асинхронным электроприводом // Кодкин В. Л., Шмарин Я. А., Аникин А. С., Балденков А. А. № 2014151549/07; заявл. 17.11.15; опубл. 15.09.16. Бюл. № 28.

**БАЛДЕНКОВ Александр Александрович**, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод», Южно-Уральский государственный университет; инженер ООО «КОСТЕС», г. Челябинск.

Адрес для переписки: baloo@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7751-5334

AuthorID (SCOPUS): 57200150858

**КОДКИН Владимир Львович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод».

Адрес для переписки: kodkina2@mail.ru

SPIN-код: 1872-2435

ORCID: 0000-0003-4554-1153

AuthorID (SCOPUS): 56459057400

ResearcherID: Y-8281-2018

**АНИКИН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники».

Адрес для переписки: anikinas@susu.ru

SPIN-код: 3449-0353

ORCID: 0000-0003-3203-4910

AuthorID (SCOPUS): 16512495400

ResearcherID: A-9929-2014

#### Для цитирования

Балденков А. А., Кодкин В. Л., Аникин А. С. Оценка динамики асинхронного привода по нелинейной передаточной функции. Коррекция нелинейности асинхронного электропривода // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 51–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-51-57.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

© А. А. Балденков, В. Л. Кодкин, А. С. Аникин