

Исследование регулируемого асинхронного электропривода в режиме генераторного торможения

¹КЕНЕСОВА Перизат Еркинкызы, магистр, piko-09@mail.ru,

²КАВЕРИН Владимир Викторович, к.т.н., и.о. профессора, kaverinkz@inbox.ru,

¹ТАТКЕЕВА Галия Галымжановна, д.т.н., зав. кафедрой, tatkeeva@mail.ru,

²ЮГАЙ Вячеслав Викторович, PhD, и.о. зав. кафедрой, slawa_v@mail.ru,

^{2*}ВОЙТКЕВИЧ Софья Валентиновна, PhD, и.о. доцента, sofiya_v@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Астана, пр. Женис, 62,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Статья посвящена исследованию регулируемого асинхронного электропривода в режиме управляемого динамического торможения. Выполнен анализ технических характеристик элементов силовой части регулируемого электропривода. Обосновано использование метода гармонического баланса с использованием средств имитационного моделирования. Получена линейная передаточная функция неизменной части асинхронного электропривода по каналу управления частотой. Выполнен анализ коэффициентов и постоянных времени линейной передаточной функции для электродвигателей серии АДЧР в диапазоне мощности от 4 до 160 кВт.

Ключевые слова: регулируемый асинхронный электропривод, управляемое торможение, метод гармонического баланса, имитационное моделирование, логарифмические амплитудно-частотные характеристики, динамические характеристики.

Введение

В теоретических исследованиях большое внимание уделяется динамическим характеристикам регулируемого электропривода с частотным преобразователем в двигательном режиме. Регулируемые генераторные режимы работы частотного электропривода изучены в меньшей степени. Управление тормозным моментом частотного электропривода в режиме управляемого динамического торможения работы является важной задачей, общим решением которой в конечном итоге должен явиться синтез системы автоматического регулирования моментом электродвигателя в тормозном режиме. Для того чтобы синтезировать систему автоматического регулирования, в первую очередь необходимо получить линейные передаточные функции моментных характеристик электродвигателя по каналу управления. Одним из путей решения вопроса управления тормозным моментом в частотном электроприводе со звеном постоянного тока является построение системы с обратной связью по постоянному току. Причем указанные характеристики должны быть получены для всего рабочего диапазона координат состояний объекта при различных значениях возмущающих факторов и начальных условий [1-

3]. Авторами предлагался метод линеаризации, основанный на введении положительной динамической обратной связи по току статора. Данный метод не применим для линеаризации неизменной части электропривода в режиме управляемого динамического торможения. Научной новизной работы является применение метода гармонического баланса для линеаризации неизменной части электропривода в режиме управляемого динамического торможения с использованием пакета прикладных программ MATLAB. Предлагаемый метод позволяет получить линейную передаточную функцию по каналу управления и выполнить анализ изменения постоянных времени и коэффициентов в зависимости от величины управляющего сигнала.

Асинхронный электродвигатель является нелинейным объектом управления, поскольку в структурной схеме его имеются перекрестные связи, поэтому задача синтеза системы автоматического регулирования (САР) усложняется. Необходимость линеаризации вытекает из условия включения в структуру системы линейного регулятора. Применение линейных регуляторов обусловлено их способностью с максимальным быстродействием обрабатывать изменение вход-

ного сигнала системы, а также тем, что для линейных систем изучено и применяется большое разнообразие различных принципов и законов управления. С целью линеаризации нелинейных зависимостей объекта управления в работе был применен метод гармонического баланса. Важным этапом при линеаризации с использованием метода гармонической линеаризации является получение логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) объекта управления. Кроме того, в рассматриваемой системе имеет место вторая нелинейность – это автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Моделирование электропривода в режиме управляемого торможения

С целью получения ЛАЧХ рассматриваемой системы электропривода по каналу частота питающего напряжения электродвигателя – ток на стороне постоянного напряжения преобразователя была разработана имитационная модель, которая представлена на рисунке 1 [4-5].

Имитационные эксперименты проводились

на базе двигателей серии АДЧР. Данный тип электродвигателей получил распространение в промышленности для работы в составе регулируемого электропривода по скорости. Технические характеристики двигателей приведены в таблице.

Приведенная на рисунке 1 модель включает в себя следующие основные блоки:

- блок A1 – блок формирования синусоидальных сигналов, управляющих системой управления автономного инвертора. Данный блок задает частоту питающего напряжения и формирует трехфазный синусоидальный сигнал управления с единичной амплитудой;

- Subsystem 1 – блок формирования амплитудного значения управляющего сигнала автономного инвертора. С помощью этого блока задается величина среднего напряжения питания электродвигателя, а также подается входное гармоническое воздействие для снятия частотных характеристик исследуемой системы;

- PWM Generator – система управления автономного инвертора. Блок предназначен для формирования управляющих импульсов для тран-

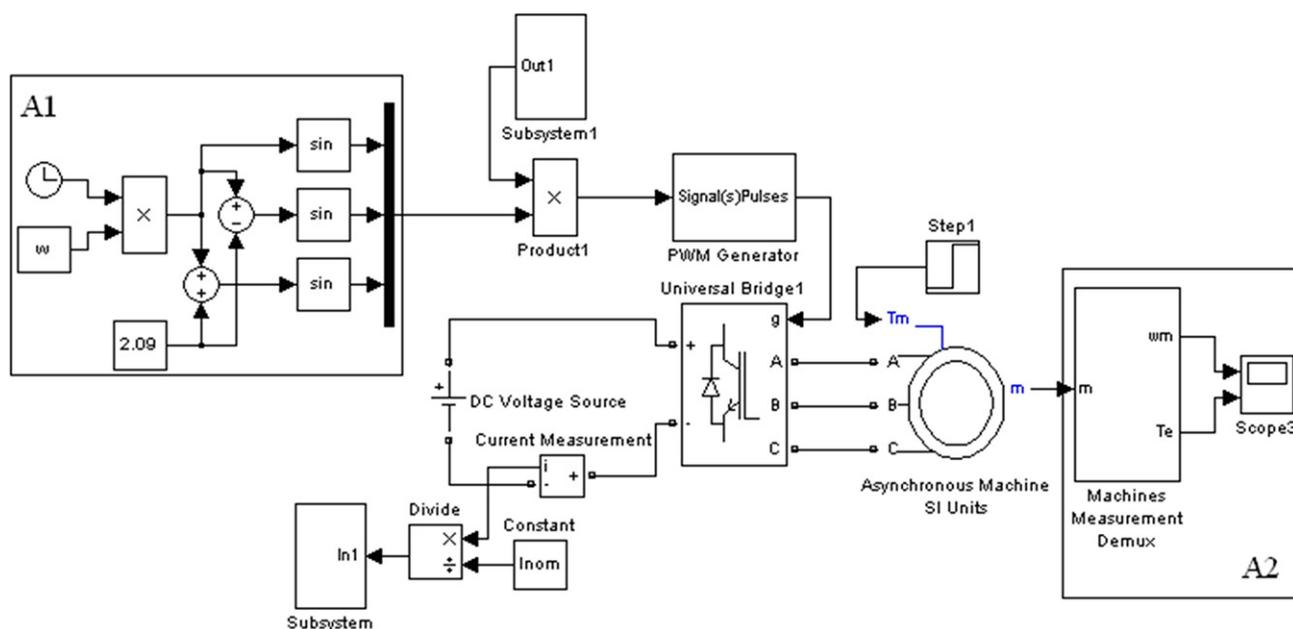


Рисунок 1 – Имитационная модель для снятия частотных характеристик электропривода

Технические характеристики двигателей

Тип	Номинальная мощность, кВт	Номинальная скорость, об/мин	Номинальный момент, Н·м	Максимальная скорость, об/мин	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Номинальная частота, Гц	cosφ	Момент инерции, кг·м²
АДЧР100Л4	4	1410	27,1	4500	8,5	380	50	0,81	0,029
АДЧР200М4	37	1470	240	4500	72,0	380	50	0,85	0,27
АДЧР250S4	75	1485	482	4500	142	380	50	0,85	1,0
АДЧР280S4	110	1485	707	4500	202	380	50	0,87	2,19
АДЧР315S4	160	1485	1028	4500	287	380	50	0,89	3,57

зисторов инвертора по входному трехфазному управляющему сигналу;

- Subsystem – блок регистрации и выделения выходных сигналов тока на стороне постоянного напряжения. Блок выделяет из общего сигнала постоянного тока амплитудные значения сигналов для каждой из частот, подаваемых на вход из блока Subsystem1;

- DC Voltage Source – источник постоянного напряжения, моделирующий работу конденсаторного сглаживающего фильтра с системой ограничения напряжения на нем;

- Current Measurement – датчик тока на стороне постоянного напряжения, предназначенный для регистрации сигнала тока;

- Universal Bridge1 – трёхфазный автономный инвертор на базе силовых IGBT-транзисторов;

- Asynchronous Machine SI Units – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором;

- Step1 – блок подачи момента на вал асинхронного электродвигателя. Формирует скачкообразный наброс раскручивающего момента на вал электродвигателя;

- Asynchronous Machine SI Units – асинхронная машина;

- блок A2 – блок выделения, регистрации и отображения необходимых координат электропривода.

Блок Subsystem1 является подсистемой, содержащей в себе набор элементарных блоков. Структура его изображена на рисунке 2.

Блок Subsystem1 предназначен для суммирования и подачи на вход системы сигнала, являющегося суммой постоянной и нескольких переменных гармонических составляющих различной частоты. В данном блоке используются источники синусоидальных сигналов разных частот. Выходные сигналы от них подаются на вход сумматора. Частоты используемых гармонических сигналов равномерно распределены на интервале, в пределах которого проводится линеаризация системы.

Таким образом, снятие ЛАЧХ производится методом подачи на ее вход гармонического воздействия определенной амплитуды и измерения амплитуд выходных сигналов на соответствующих частотах, с последующим вычислением коэффициента усиления, как отношения амплитуд входного и выходного сигналов для соответствующих частот.

Блок Subsystem также является подсистемой, содержащей в себе набор нескольких элементарных блоков. Развернутая структура его изображена на рисунке 3. С целью повышения порядка избирательного фильтра используется схема последовательного включения избирательных фильтров второго порядка. Количество однотипных звеньев определялось в процессе имитационных экспериментов, путём оценки подавления соседних гармоник. Их амплитуда на выходе фильтра не должна превышать 5%. Имитационная модель блока Subsystem разделена на две части для

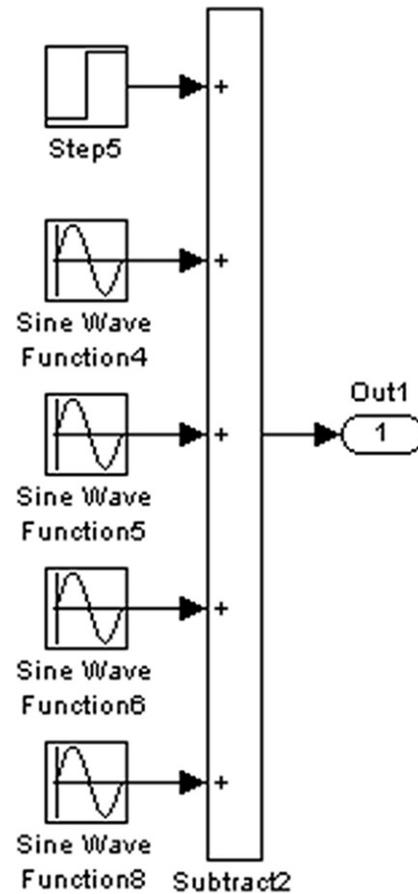
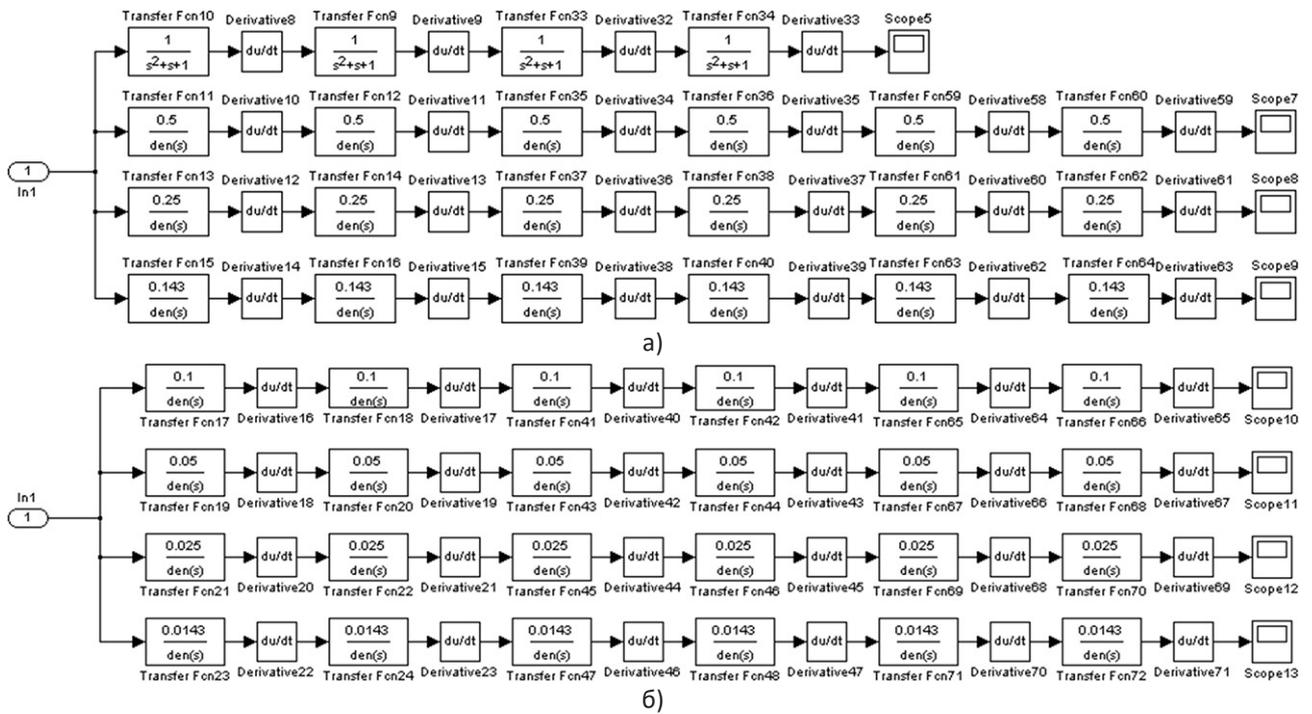


Рисунок 2 – Развернутая структура блока Subsystem1

снятия частотных характеристик на различных участках частот. В процессе имитационных исследований ЛАЧХ были сняты для среднечастотного участка, где частота составляет 1, 2, 4, 7 рад/с, и высокочастотного участка, где частота составляет 10, 20, 40 рад/с. Необходимость разделения частот снятия ЛАЧХ на два участка вызвана большой разностью по времени стабилизации амплитуды выходной величины для частот менее 10 рад/с, и более 10 рад/с.

Как видно из приведенных рисунков, на вход модели одновременно подаются синусоидальные сигналы равной амплитуды четырех различных частот – отдельно для каждого из участков. Выделение выходных сигналов разных частот из общего сигнала датчика постоянного тока для измерения амплитуд и последующего построения ЛАЧХ производится с помощью фильтров второго порядка с постоянными времени, соответствующими частоте входного сигнала. Сигнал датчика тока проходит через фильтры второго порядка и дифференциальные звенья, которые последовательно отфильтровывают искажения синусоидального сигнала. В результате после нескольких преобразований выходной сигнал считается синусоидальным, и его амплитуда измеряется для последующего построения ЛАЧХ. Частотные характеристики снимались для трех значений частот



а) для низких частот, б) для высоких частот
 Рисунок 3 – Развернутая структура блока Subsystem

напряжения статорных обмоток – 2, 4, 6 Гц. Это обусловлено тем, что с изменением частоты напряжения статора статический коэффициент передачи линейного звена значительно изменяется.

Теоретические исследования электропривода в режиме управляемого торможения

Полученные в результате имитационных экспериментов ЛАЧХ по каналу потребляемого тока силовой частью относительно сигнала управления частотой напряжения питания статорных обмоток электропривода представлены на рисунке 4.

Из анализа приведенных частотных характеристик асинхронного электропривода видно, что форма ЛАЧХ соответствует передаточной функции звена третьего порядка вида:

$$W_{\text{лнч}} = K \frac{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)}{(T_3^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot T_3 \cdot p + 1)(T_4 \cdot p + 1)} \quad (1)$$

Данное выражение является линейной передаточной функцией неизменной части электропривода в режиме регулируемого динамического торможения. Численные значения постоянных времени T_1 и T_2 , а также T_3 и T_4 отличаются незначительно. Постоянные времена T_1 и T_2 при изменении частоты питающего напряжения практически не меняются. На различных частотах питающего напряжения электропривод одной и той же мощности проявляет различные свойства. С ростом частоты питающего напряжения наблюдается значительное снижение величины статического коэффициента передачи K и уменьшение

постоянных времени T_3 и T_4 . Показатель колебательности ζ при этом в зависимости от мощности электропривода значительно не изменяется.

На основании полученных частотных характеристик в работе были построены диаграммы зависимости статического коэффициента передачи $L(\omega)$ и постоянной времени T_3 линейных звеньев в функции сигнала управления по частоте напряжения статорных обмоток и мощности электродвигателей. Указанные диаграммы представлены на рисунках 5-6.

Выводы

Таким образом, с использованием метода гармонического баланса в настоящей работе была проведена линеаризация неизменной части асинхронного электропривода по каналу частота напряжения статорных обмоток – ток на стороне постоянного напряжения преобразователя частоты. Получены ЛАЧХ таких нелинейных объектов, как асинхронный электродвигатель и автономный инвертор напряжения на базе широтно-импульсной модуляции.

Также установлено, что величина статического коэффициента передачи линейного звена с ростом мощности и частоты напряжения статорных обмоток снижается. Величина постоянной времени линейного звена с ростом мощности незначительно растет, а в диапазоне мощности электродвигателей более 37 кВт ее значение становится практически постоянным.

Поскольку температурный режим статорных обмоток определяется активной составляющей

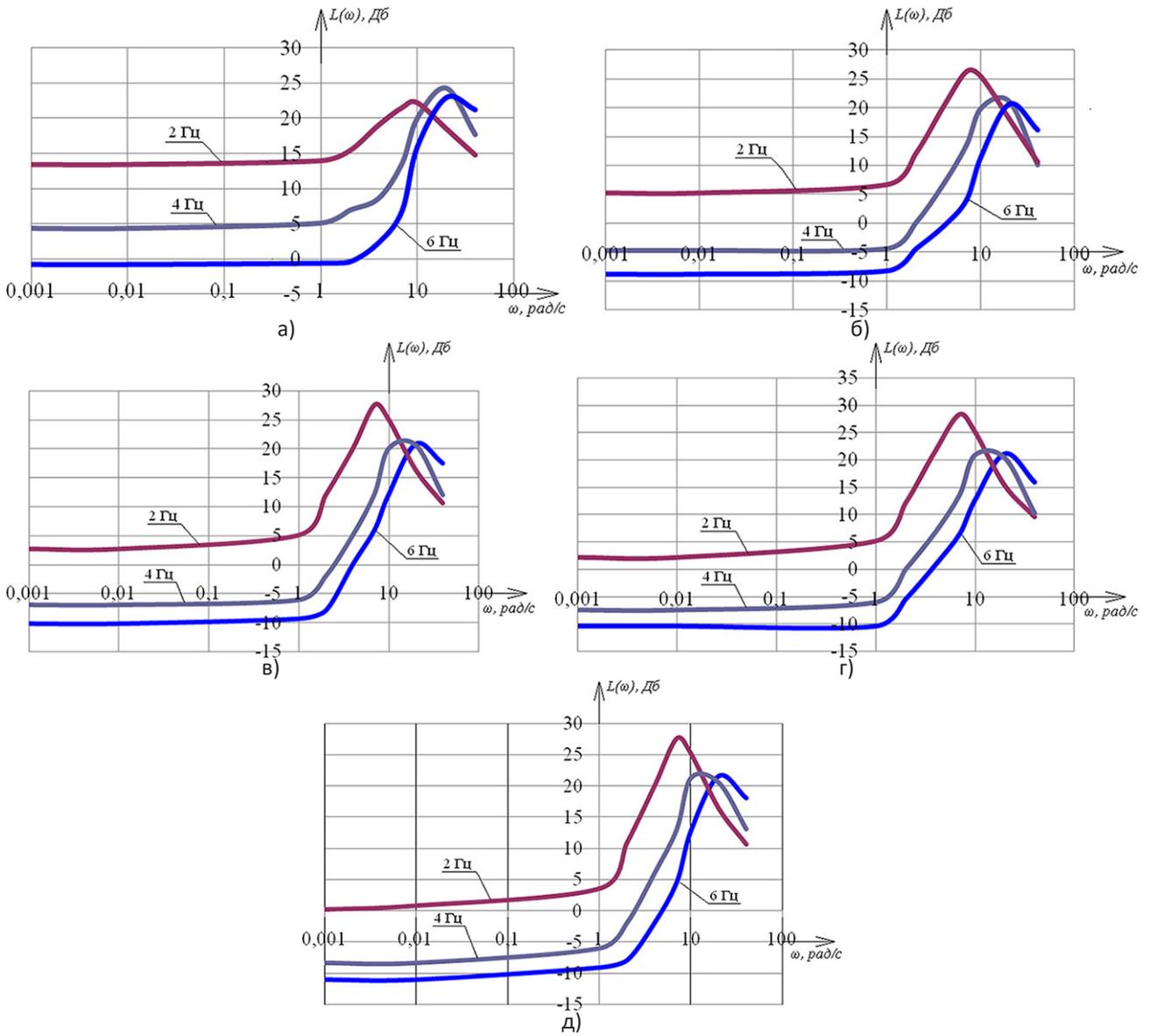
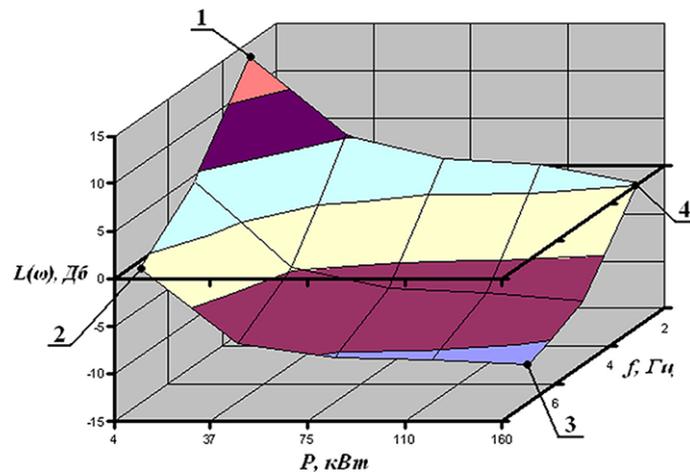
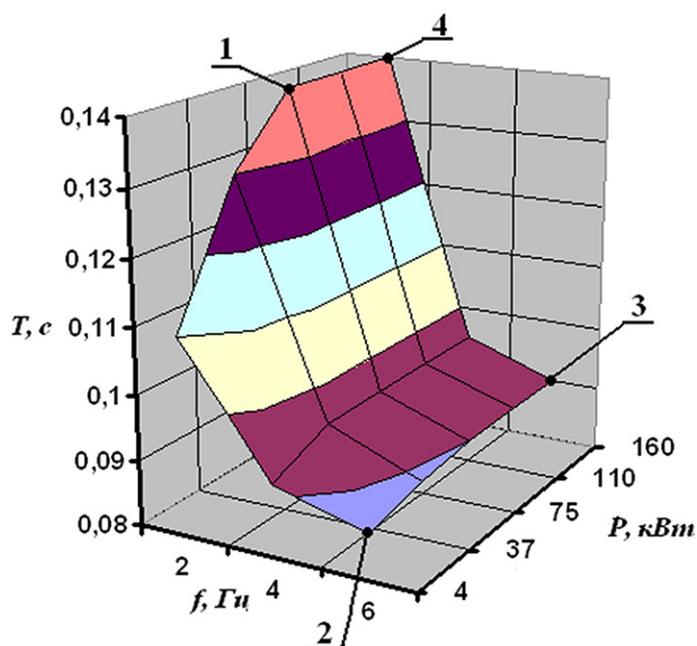


Рисунок 4 – ЛАЧХ асинхронного электропривода различной мощности при различных частотах питающего напряжения



1 – (2 Гц; 4 кВт; 13,4 Дб), 2 – (6 Гц; 4 кВт; -0,82 Дб), 3 – (6 Гц; 160 кВт; -11 Дб), 4 – (2 Гц; 160 кВт; 0,17 Дб)
 Рисунок 5 – Диаграмма зависимости статического коэффициента передачи $L(\omega)$ линейного звена от частоты напряжения статора и мощности электродвигателей



1 – (2 Гц; 4 кВт; 0,14 Дб), 2 – (6 Гц; 4 кВт; – 0,09 Дб), 3 – (6 Гц; 160 кВт; 0,09 Дб), 4 – (2 Гц; 160 кВт; 0,14 Дб)

Рисунок 6 – Диаграмма зависимости постоянной времени T_3 линейного звена от частоты напряжения статора и мощности электродвигателей

тока цепи статора, то ограничение тока в режиме регулируемого динамического торможения целесообразно осуществлять в силовой цепи питания инвертора. Ток на стороне постоянного напряжения чисто активный и не содержит реактив-

ной составляющей. Кроме того, измерение тока на стороне постоянного напряжения технически проще реализовать, чем измерение фазного тока двигателя, что также является немаловажным фактором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kodkin V.L. Spectral Analysis of Rotor Currents in Frequency-controlled Electric Drives / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, A.A. Baldenkov // 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2017). – Proceedings. – Shenzhen, China, 16-17.09.2017.
2. Kodkin, V.L. Methods of Optimizing the Speed and Accuracy of Optical Complex Guidance Systems Based on Equivalence of Automatic Control System Domain of Attraction and Unconditional Stability of Their Equivalent Circuits / V.L. Kodkin, A.A. Вашенко / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Том. 17. – № 1. – С. 23-33.
3. V.L. Kodkin, A.S. Anikin and Y.A. Shmarin, «Dynamic load disturbance correction for alternative current electric drives», 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911528. – 2017. 4.
4. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSys и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.

Генераторлық тежеу режимінде реттелетін асинхронды электр жетегін зерттеу

¹КЕНЕСОВА Перизат Еркинқызы, магистр, piko-09@mail.ru,

²КАВЕРИН Владимир Викторович, т.ф.к., профессор м.а., kaverinkz@inbox.ru,

¹ТАТКЕЕВА Ғалия Ғалымжанқызы, т.ф.д., кафедра меңгерушісі, tatkeeva@mail.ru,

²ЮГАЙ Вячеслав Викторович, PhD, кафедра меңгерушісі м.а., slawa_v@mail.ru,

^{2*}ВОЙТКЕВИЧ Софья Валентиновна, PhD, доцент м.а., sofiya_v@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Жеңіс даңғылы,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақала басқарылатын динамикалық тежеу режимінде реттелетін асинхронды электр жетегін зерттеуге арналған. Реттелетін электр жетегінің қуат бөлігі элементтерінің техникалық сипаттамаларына талдау жасалады. Модельдеу құралдарын қолдана отырып, гармоникалық тепе-теңдік әдісін қолдану негізделген. Жиілікті басқару арнасы арқылы асинхронды электр жетегінің өзгермейтін бөлігінің сызықтық беріліс функциясы алынды. АДЧР сериялы электр қозғалтқыштары үшін 4-тен 160 кВт-қа дейінгі қуат диапазонында коэффициенттер мен уақыт тұрақтыларына сызықтық беріліс функциясының талдауы жасалды.

Кілт сөздер: реттелетін асинхронды электр жетегі, басқарылатын тежеу, гармоникалық сызықтық талдау, имитациялық модельдеу, логарифмдік амплитудалық жиілік сипаттамалары, динамикалық өнімділік.

Investigation of an Adjustable Asynchronous Electric Drive in the Generator Braking Mode

¹KENESOVA Perezat, Master, piko-09@mail.ru,

²KAVERIN Vladimir, Cand. of Tech. Sci., Acting Professor, kaverinkz@inbox.ru,

¹TATKEYEVA Galiya, Dr. of Tech. Sci., Head of Department, tatkeeva@mail.ru,

²YUGAY Vyacheslav, PhD, Acting Head of Department, slawa_v@mail.ru,

²*VOITKEVICH Sofya, PhD, Acting Associate Professor, sofya_v@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University», Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. The article is devoted to the study of an adjustable asynchronous electric drive in the mode of controlled dynamic braking. The analyzes the technical characteristics of the elements of the power part of the adjustable electric drive. The use of the harmonic balance method with the use of simulation tools is justified. The linear transfer function of the invariant part of the asynchronous electric drive through the frequency control channel is obtained. The analysis of the coefficients and time constants of the linear transfer function for AMFR series electric motors in the power range from 4 to 160 kW is performed.

Keywords: adjustable asynchronous electric drive, controlled braking, harmonic linearization, simulation modeling, logarithmic amplitude-frequency characteristics, dynamic characteristics.

REFERENCES

1. Kodkin V.L. Spectral Analysis of Rotor Currents in Frequency-controlled Electric Drives / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, A.A. Baldenkov // 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2017). – Proceedings. – Shenzhen, China, 16-17.09.2017.
2. Kodkin, V.L. Methods of Optimizing the Speed and Accuracy of Optical Complex Guidance Systems Based on Equivalence of Automatic Control System Domain of Attraction and Unconditional Stability of Their Equivalent Circuits / V.L. Kodkin, A.A. Vashepko / Vestnik JuUrGU. Seriya «Komp'yuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika». – 2017. – Tom. 17. – No. 1. – pp. 23-33.
3. V.L. Kodkin, A.S. Anikin and Y.A. Shmarin, «Dynamic load disturbance correction for alternative current electric drives», 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911528. – 2017. 4.
4. Terehin V.B. Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (Matlab 7.0.1): uchebnoe posobie. – Tomsk: Publ. Tomskogo politexnicheskogo universiteta, 2008. – 320 p.
5. Chernyh I.V. Modelirovanie elektrotexnicheskix ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystes i Simulink. Moscow: DMK Press; Saint Petersburg: Piter, 2008. 288 p.