

Исследование регулируемого электропривода постоянного тока в режиме генераторного торможения

¹КЕНЕСОВА Перизат Еркинқызы, 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, sofya_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 электропривода постоянного тока с компенсированным электродвигателем независимого возбуждения серии 4ПФ в режиме управляемого генераторного торможения. Выполнена линеаризация модели, получена линейная передаточная функция по каналу управления. Определены зависимости показателя колебательности и постоянной времени в функции скважности импульсного преобразователя в тормозном режиме, определён рабочий диапазон тормозного режима. В результате теоретических исследований определён рабочий диапазон изменения скважности импульсного преобразователя в цепи якоря электродвигателя. Получены зависимости поправочных коэффициентов для передаточной функции линейной части схемы замещения электропривода в режиме управляемого динамического торможения, позволяющие учитывать нелинейность импульсного преобразователя.

Ключевые слова: регулируемый электропривод постоянного тока, управляемое генераторное торможение, линеаризация, имитационное моделирование, импульсный преобразователь, динамические характеристики.

Введение

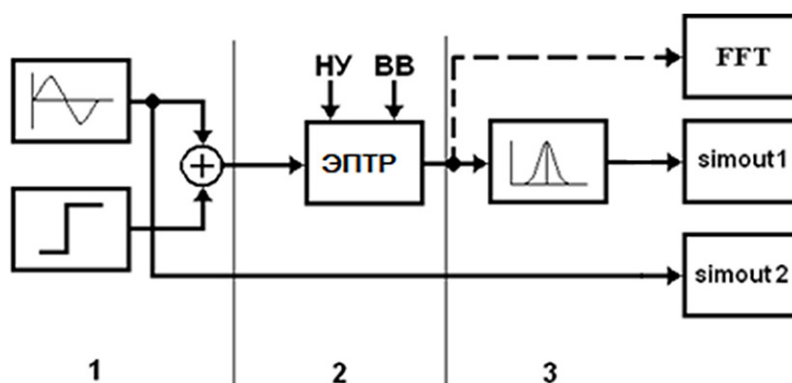
Процессы, протекающие в силовой части регулируемого электропривода с преобразователями повышенной частоты описываются, как правило, нелинейными уравнениями. Использование корневых методов, методов ЛАЧХ для параметрической оптимизации элементов САР требует линеаризации математической модели объекта управления, с учётом режимов работы и особенностей схемотехнического решения силовой части электропривода. Для линеаризации математической модели и оценки динамических свойств неизменной части электропривода достаточно часто используют переходную характеристику и логарифмические амплитудно-частотную (ЛАЧХ) и фаза-частотную (ЛФЧХ) характеристики. В первом приближении используют первую гармонику выходного сигнала для анализа ЛАЧХ и ЛФЧХ соответственно. Совокупность этих характеристик позволит подобрать линейную передаточную функцию и определить характер из-

менения коэффициентов и постоянных времени в функции величины управляющего и возмущающего воздействий.

Существующие аналитические методы построения ЛАЧХ и ЛФЧХ достаточно трудоёмки. В ряде случаев, например с использованием в силовой цепи электропривода импульсного преобразователя, использование этих методов для линеаризации полупроводникового электропривода – невозможно. С появлением современных средств имитационного моделирования стало возможным получение ЛАЧХ и ЛФЧХ.

В работе для линеаризации модели электропривода постоянного тока с двигателем независимого возбуждения использован метод гармонической линеаризации с использованием MatLab – Simulink. В результате имитационных экспериментов будут получены семейства ЛАЧХ угловой скорости относительно канала управления [1-2].

Обобщённая структура модели представлена на рисунке 1.



1 – Гармонический сигнал по каналу управления; 2 – ЭПТР – электропривод в тормозном режиме, НУ – начальные условия, ВВ – возмущающее воздействие; 3 – средства контроля

Рисунок 1 – Структурная схема линеаризации электропривода

В процессе имитационных экспериментов варьируя частоту гармонического сигнала по каналу управления, необходимо соответственно менять резонансную частоту избирательного фильтра в блоке средства контроля (рисунок 1) [3].

Максимальная частота гармонического сигнала по каналу управления не должна превышать частоту импульсного преобразователя ЭПТР.

Результаты имитационного моделирования для дальнейшего анализа и линеаризации неизменной части электропривода целесообразно представить в графическом виде [5-6].

Теоретические исследования электропривода постоянного тока в режиме управляемого торможения

Согласно рекомендациям нормативных документов в технических требованиях технического задания и в руководстве по эксплуатации отражена необходимость регулирования тормозного момента, приводов анализируемого класса машин и механизмов при торможении.

Таким образом, для регулирования скорости и тормозного момента необходимо выполнить линеаризацию и определить динамические характеристики неизменной части электропривода относительно канала управления [7-10].

С целью определения линейной передаточной функции регулируемого электропривода по каналу управления разработана имитационная модель для определения ЛАЧХ, которая представлена на рисунке 2.

С целью построения семейства ЛАЧХ для различных значений скважности импульсного преобразователя, на его управляющий вход подаётся суммарный сигнал постоянной величины задающего воздействия (Step5) и гармонического сигнала синусоидальной формы (Sine Wave Function блока Г) имитационной модели. Посредством блока To Workspace2 осуществлялась регистрация сигнала синусоидальной формы, подаваемого на управляющий вход импульсного преобразователя А1. С помощью блоков To Workspace3 и To

Workspace4 регистрировались сигналы электромагнитного момента и угловой скорости соответственно как реакция на управляющее гармоническое воздействие. Разложение в ряд Фурье и определение амплитуды первой гармоники выходного сигнала осуществлялось посредством блока Continuous.

В соответствии с методикой имитационных экспериментов, для каждого последующего эксперимента величина статического задающего воздействия (СЗВ) изменялась в диапазоне соответствующего режиму непрерывного тока, представлена в таблице.

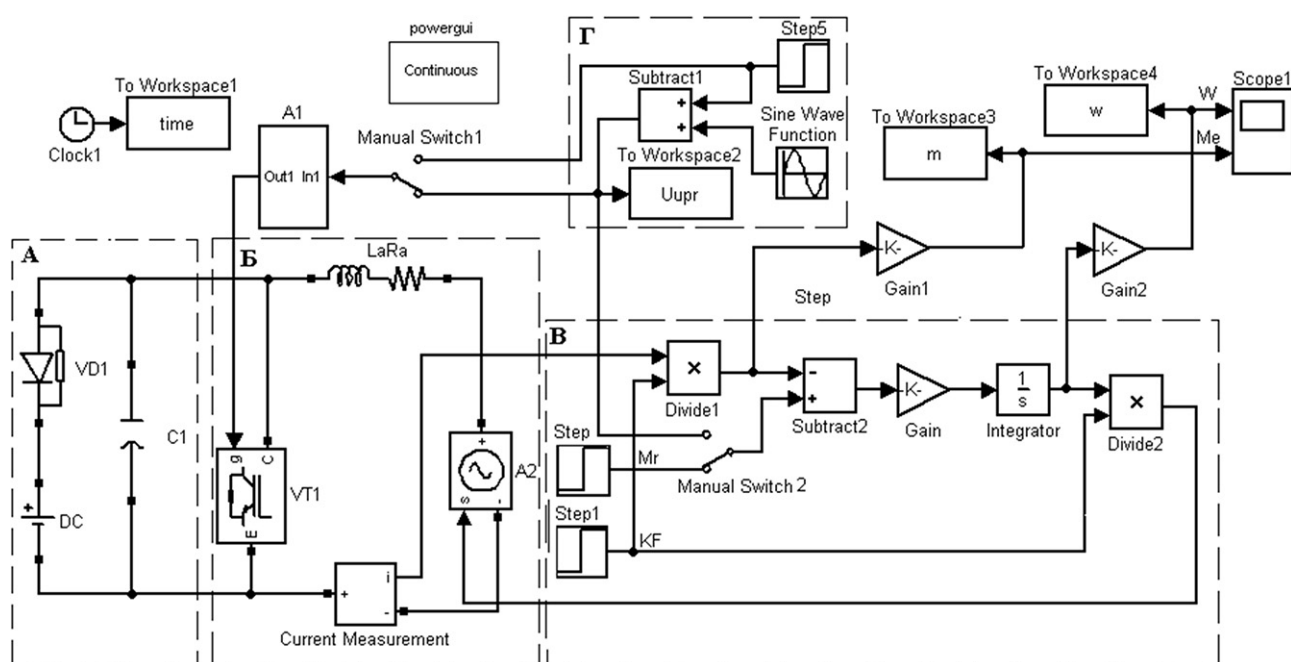
В результате имитационных экспериментов получено семейство ЭЛАЧХ для выбранных типоразмеров электродвигателей (см. таблицу).

Семейства ЭЛАЧХ (рисунок 3) выходного параметра угловой скорости вращения вала электродвигателя относительно сигнала управления импульсного преобразователя были получены для электродвигателей серии 4ПФ.

С увеличением мощности электродвигателей, при максимальной величине скважности импульсного преобразователя, увеличивается подъём ЭЛАЧХ на частоте сопряжения, причём с уменьшением скважности – подъём уменьшается. С увеличением скважности величина статического коэффициента передачи уменьшается по нелинейной зависимости.

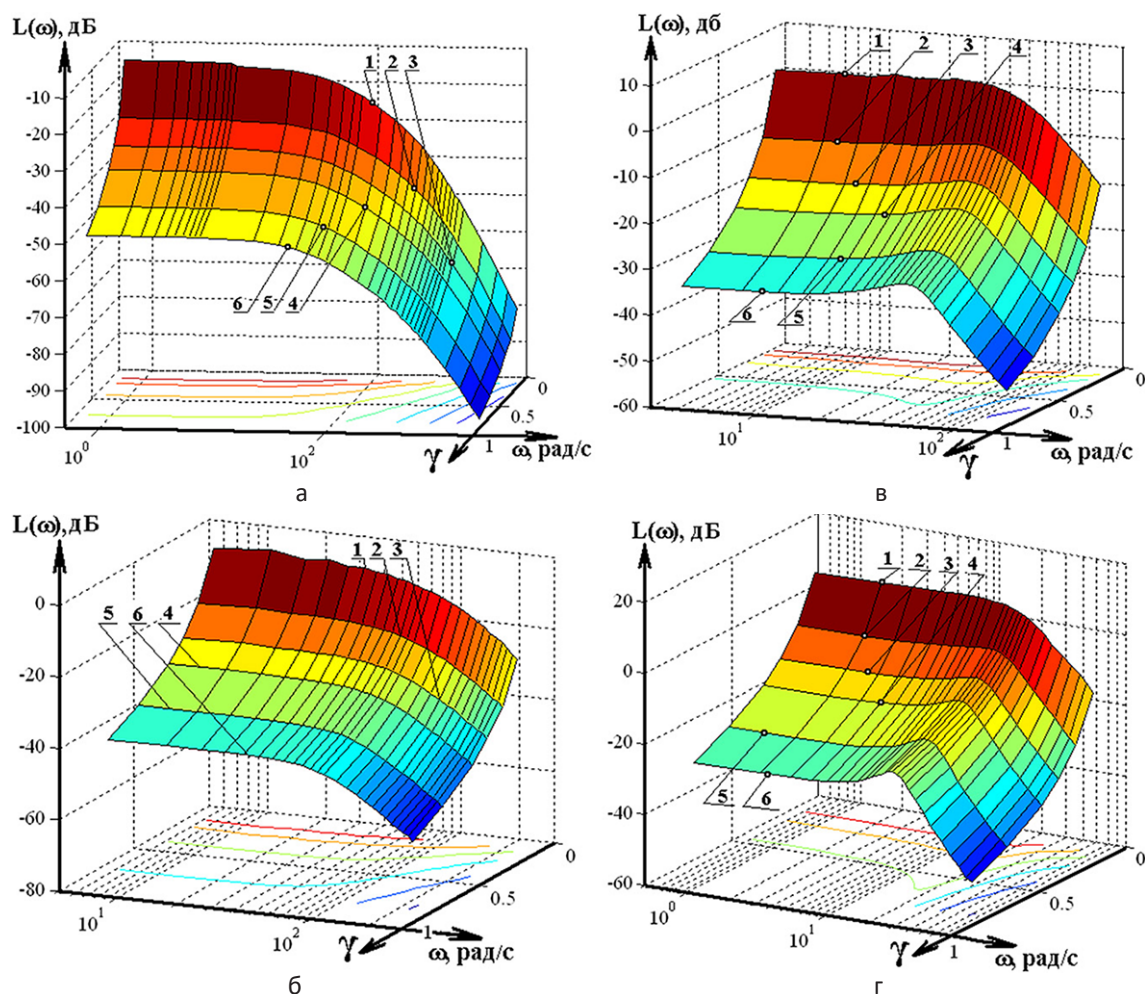
С целью определения влияния изменения скважности импульсного преобразователя VT1-A1 (рисунок 1) на величину постоянной времени T , линейной передаточной функции (1), были получены с помощью табличного редактора проекции ЛЧХ на плоскость $\omega - L(\omega)$, которые представлены на рисунке 4.

С использованием асимптотического метода на ЭЛАЧХ построены касательные горизонтальные и под наклоном -40дБ/дек , что соответствует линейным передаточным функциям второго порядка, обобщённая передаточная функция которых имеет вид:



«А» – блок ограничения напряжения на конденсаторе С; «Б» – модель силовой электрической части привода; «В» – модель механической части электродвигателя; «Г» – формирователь управляющего воздействия синусоидальной формы

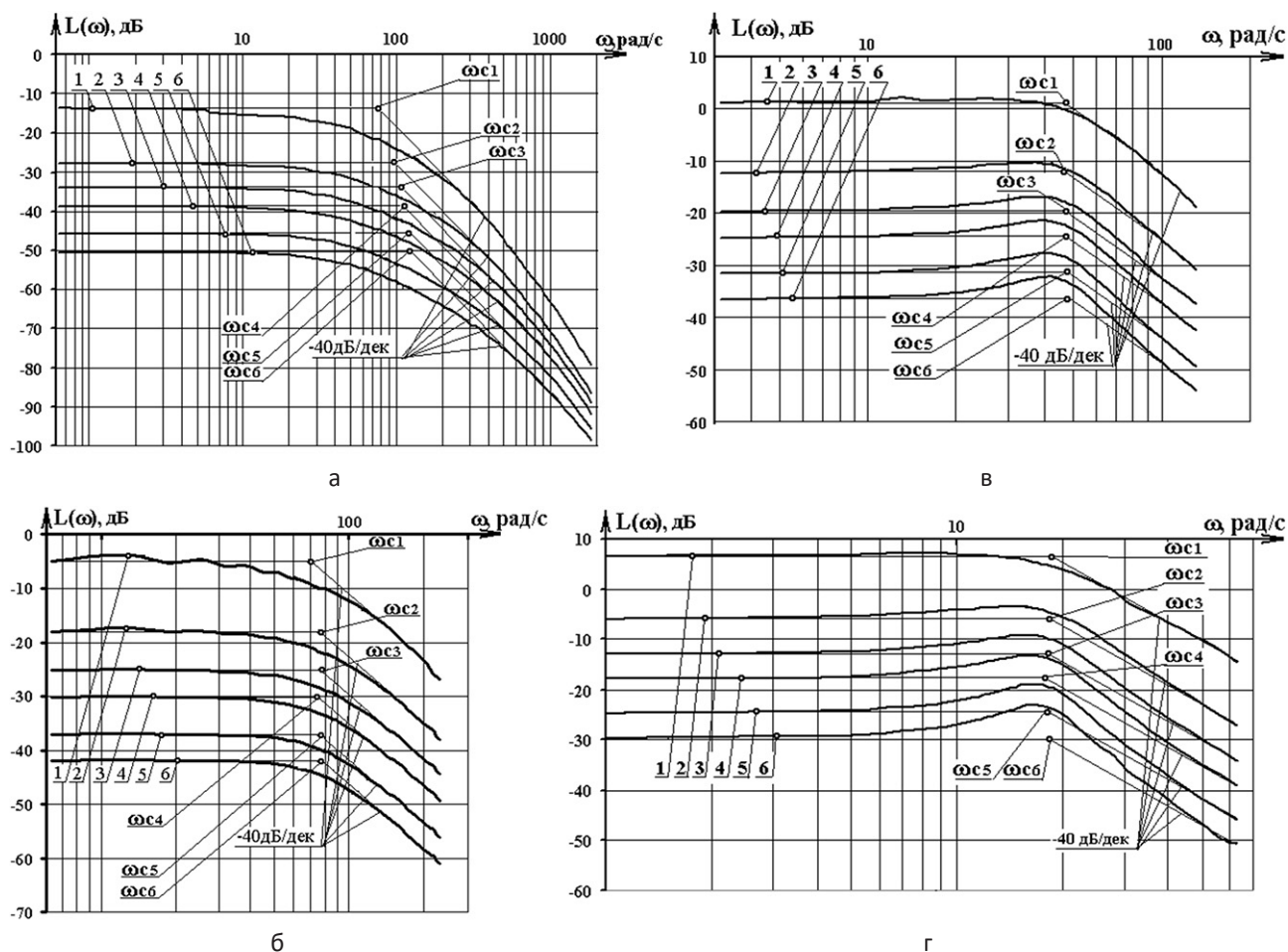
Рисунок 2 – Модель электропривода для построения ЛАЧХ по каналу управления



а) 4Ф112S; б) 4Ф132S; в) 4Ф160S; г) 4Ф180M

Рисунок 3 – Семейство ЭЛАЧХ для электродвигателей в функции скважности импульсного преобразователя

Величина задающего воздействия						
№ ЛАЧХ	1	2	3	4	5	6
Величина СЗВ	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9



а) 4ПФ112S; б) 4ПФ132S; в) 4ПФ160S; г) 4ПФ180М

Рисунок 4 – ЛАЧХ для электродвигателей

$$W = \frac{K}{T^2 P^2 + 2\xi TP + 1}.$$

С увеличением скважности импульсного преобразователя, посредством которого осуществляется управление тормозным режимом для всех типоразмеров двигателей, уменьшаются статический коэффициент передачи K и показатель колебательности ξ . Также от величины скважности зависит величина постоянной времени T , особенно ярко выражена эта зависимость у электродвигателей малой мощности.

Исследование статических характеристик регулируемого электропривода

С целью проведения анализа изменения статического коэффициента K получены проекции величины $L(\omega) = L(\omega)n - L(\omega)n - 1$ (где n – порядко-

вый номер ЛАЧХ) на плоскость $L(\omega) - \gamma$ для угловой скорости ($\omega < 10$ рад/с).

Результаты выполненных исследований, посредством табличного редактора Microsoft Excel, для соответствующих типов электродвигателей представлены на рисунке 5.

Используя данный вариант реализации управляемого режима динамического торможения можно осуществлять регулирование скорости не хуже чем 1:50 для электродвигателей в диапазоне мощности 5,5÷68кВт и номинальным значением скорости вращения вала электродвигателя 1500 об/мин.

В процессе синтеза САР также необходимо учитывать нелинейность зависимости статического коэффициента передачи от сигнала управления.

Используя ЛАЧХ, затруднительно получить

зависимости показателя колебательности в функции скажности импульсного преобразователя, посредством которого реализуется управление электроприводом в режиме динамического торможения. Для определения зависимости показателя колебательности более высокую точность даёт метод, основанный на сопоставлении реакций на единичное ступенчатое воздействие нелинейной модели силовой части электропривода и линейного звена второго порядка.

Для получения зависимости показателя колебательности разработана имитационная модель, которая представлена на рисунке 6.

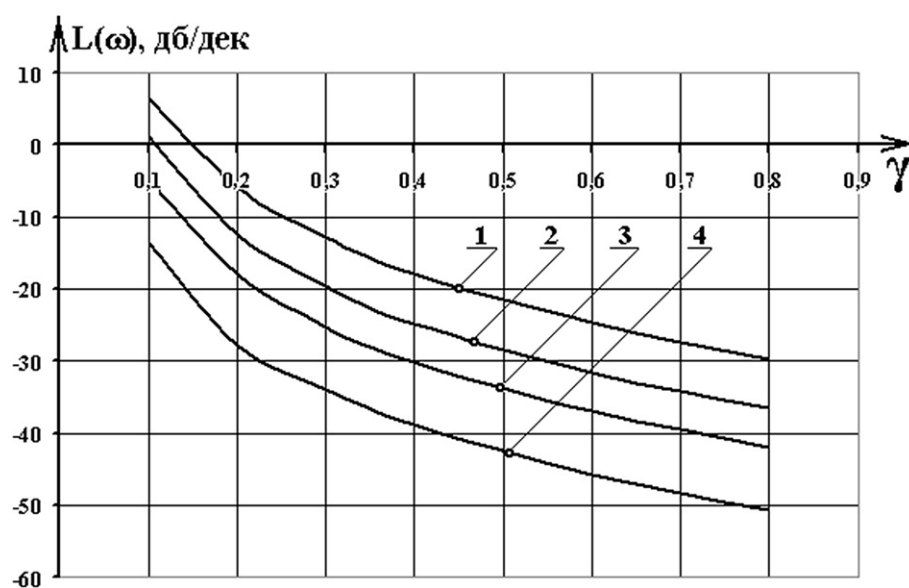
Блоки Transfer Fcn, Transfer Fcn1 и Derivative

представляют собой модели линейной части по каналу скорости и момента соответственно.

В процессе имитационных экспериментов проведены исследования влияния импульсного преобразователя на величину показателя колебательности электропривода в тормозном режиме. С этой целью изменялась величина задания (блок Step 5) в пределах от 0,3 до 0,8.

Результаты теоретических исследований представлены на рисунке 7.

В результате имитационных экспериментов установлено, что с увеличением задания показатель колебательности уменьшается, а с уменьшением задания показатель колебательности



1 — 4ПФ180М; 2 — 4ПФ160S; 3 — 4ПФ132S; 4 — 4ПФ112S

Рисунок 5 – Зависимости статических коэффициентов передачи в функции скажности

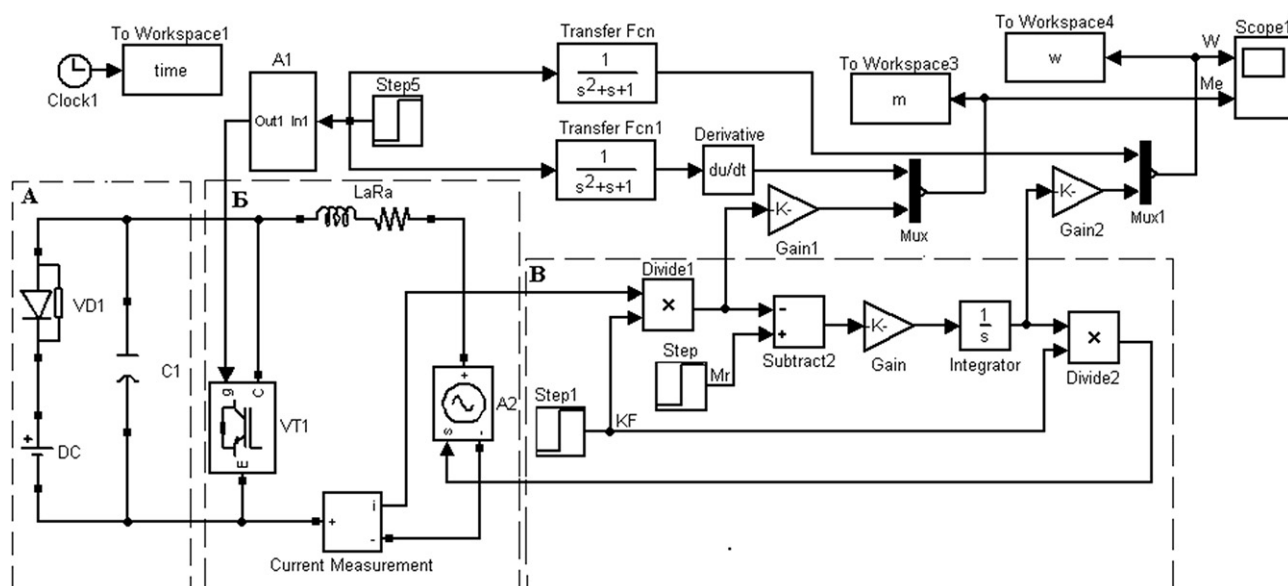


Рисунок 6 – Имитационная модель для определения зависимости показателя колебательности

возрастает.

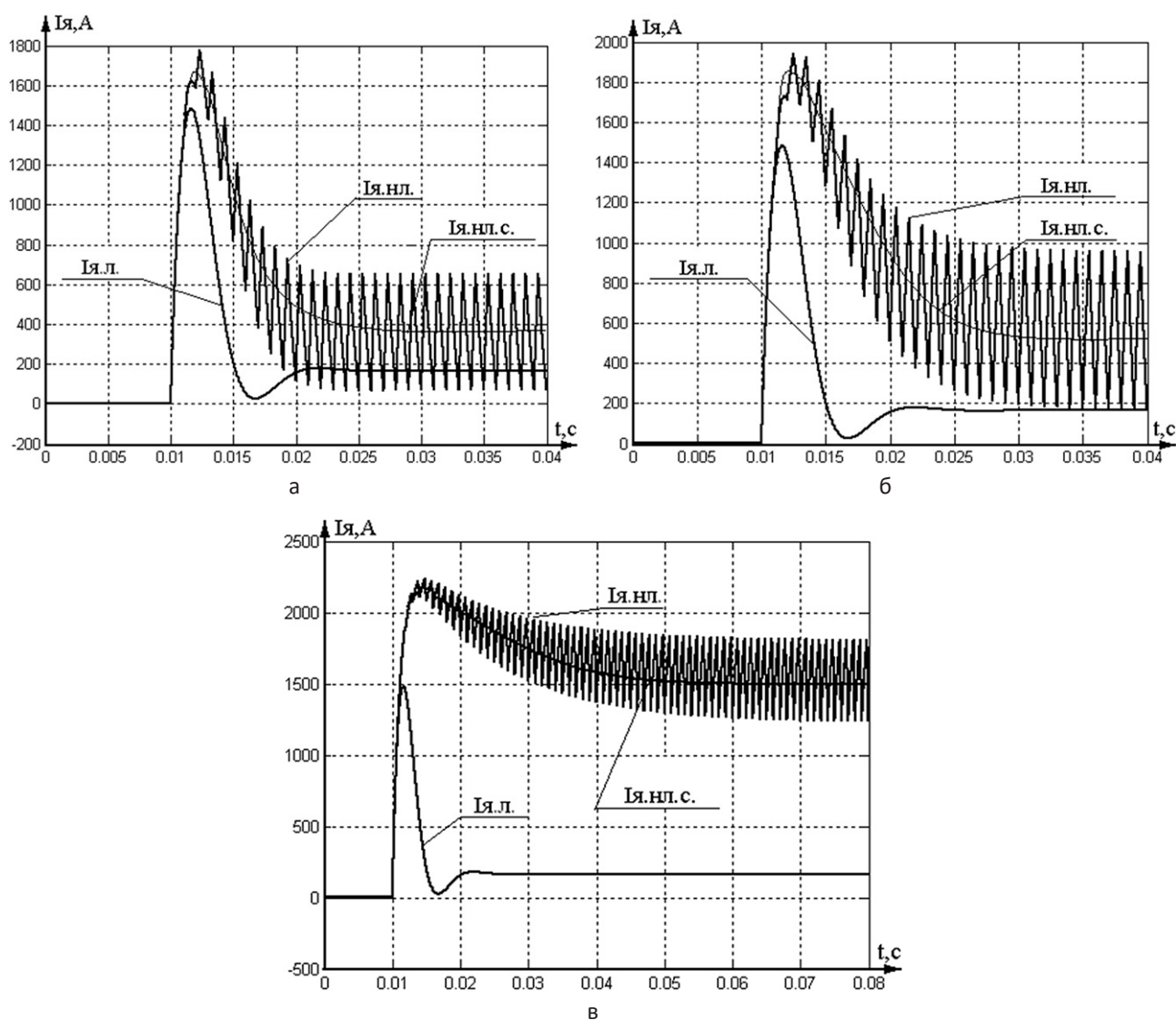
Аналогичным образом получены переходные процессы по каналу электромагнитного момента и угловой скорости для остальных типоразмеров электродвигателей. Сводные зависимости изменения постоянных времени и показателя колебательности представлены на рисунке 8.

Зависимости показателя колебательности и постоянной времени в функции скважности импульсного преобразователя А1, VT1 (рисунок 6) были получены для электродвигателей 1 – 4ПФ180М; 2 – 4ПФ160S; 3 – 4ПФ132S; 4 – 4ПФ112S. В результате теоретических исследований установлено, что с увеличением мощности электродвигателей наблюдается увеличение постоянной времени и показателя колебательности линеаризованной функции неизменной части электро-

привода в режиме динамического торможения. Величина постоянной времени и показателя колебательности в функции скважности практически не меняется. При синтезе системы автоматического регулирования эти параметры для конкретного типа электродвигателя с независимым возбуждением можно принять постоянной величиной.

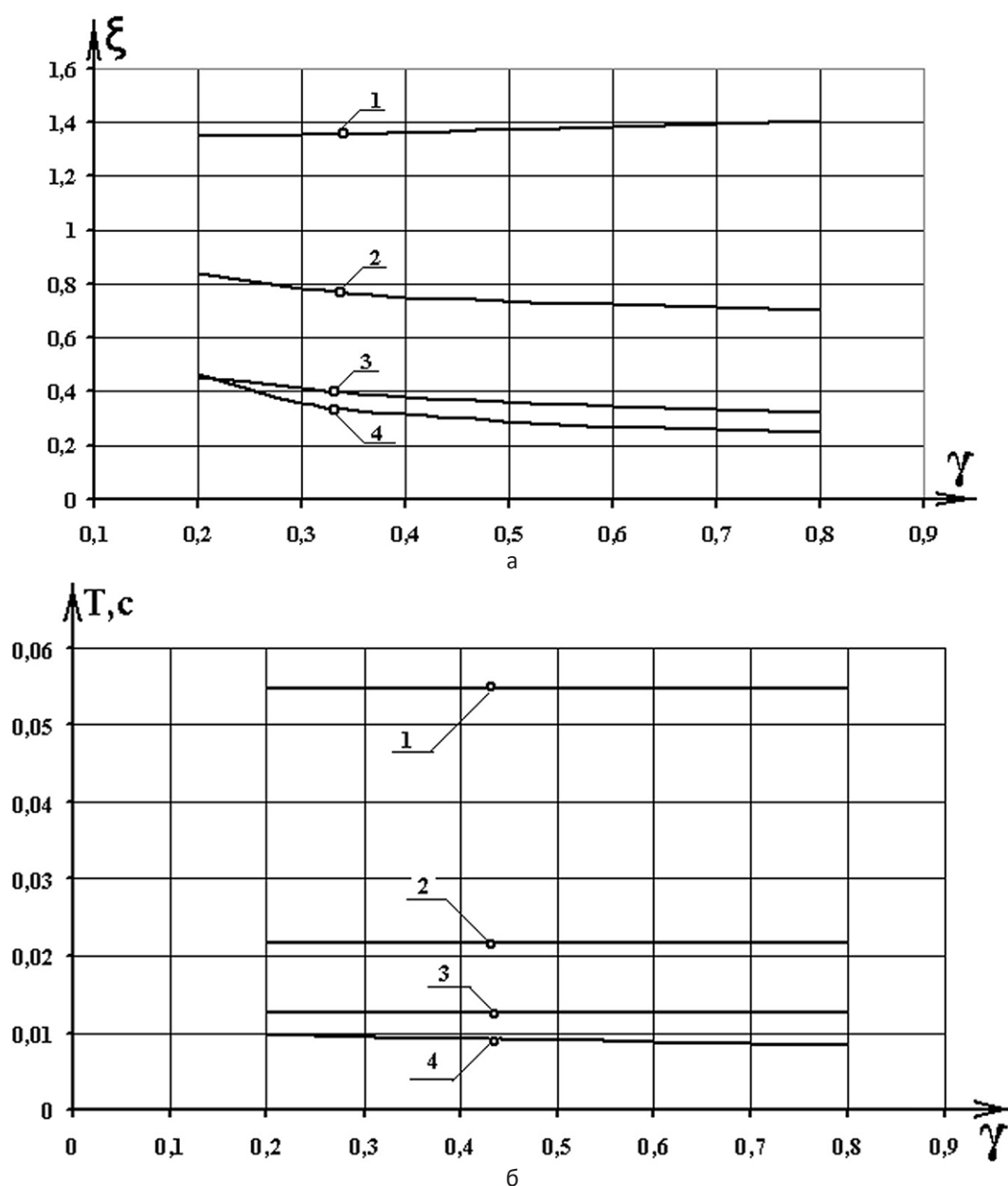
Выводы

В результате имитационных экспериментов с компенсированными электродвигателями независимого возбуждения: выполнена линеаризация модели, получена линейная передаточная функция по каналу управления, определены величины сигнала управления для тормозного режима, определён рабочий диапазон тормозного режима.



а) $Q = 3$; б) $Q = 2$; в) $Q = 1,25$

Рисунок 7 – Переходные процессы тока якоря электродвигателя и линеаризованной модели



1 – 4ПФ180М; 2 – 4ПФ160S; 3 – 4ПФ132S; 4 – 4ПФ112S

Рисунок 8 – Зависимости показателя колебательности (а) и постоянной времени (б) в функции скважности импульсного преобразователя электропривода

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб: КОРОНА принт, 2007. 256 с.
2. Каверин В.В. Регулировочные характеристики электропривода постоянного тока в режиме динамического торможения // Тр. ун-та; КарГТУ. Караганда, 2009. № 3. С. 77-79.
3. Каверин В.В., Эм Г.А. Имитационное моделирование полупроводникового электропривода постоянного тока // Тр. ун-та / КарГТУ. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2010, С. 96-99.
4. Компьютерное моделирование и идентификация электротехнических комплексов: учеб. пособие. В 3-х ч. Часть 3 / Б.Н. Фешин, Ю.Ф. Булатбаева, Г.С. Нурмаганбетова, Г.И. Паршина, Ш.З. Телбаева; КарГТУ. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2010. 63 с.
5. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т. 1. / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 598 с.
7. Требования к безопасности процессов разработки рудных, нерудных и россыпных месторождений открытым способом. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P090001939>. Дата посещения: 24.11.2021г.
8. Правила обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геолого-разведочные работы. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1400010247>. Дата посещения: 24.11.2021г.
9. ГОСТ 34434-2018 Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета.
10. ГОСТ 33597-2015 Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний.

Генераторлық тежеу режимінде реттелетін тұрақты ток электр жетегін зерттеу

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

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

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

²**ЮГАЙ 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, 62,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды,

Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақала басқарылатын генераторлық тежеу режимінде 4ПФ сериялы тәуелсіз қоздыру қозғалтқышы бар реттелетін тұрақты ток электр жетегін зерттеуге арналған. Модельдің сызықтануы орындалды, басқару арнасы бойынша сызықтық беріліс функциясы алынды. Тежеу режиміндегі импульстік түрлендіргіштің ұңғымалық функциясындағы тербеліс көрсеткіші мен уақыт тұрақтысының тәуелділігі анықталды, тежеу режимінің жұмыс диапазоны анықталды. Теориялық зерттеулер нәтижесінде электр қозғалтқышының аматуралық тізбегіндегі импульстік түрлендіргіштің ұңғымасының өзгеруінің жұмыс ауқымы анықталды. Импульстік түрлендіргіштің сызықтығын ескеруге мүмкіндік беретін басқарылатын динамикалық тежеу режимінде электр жетегін ауыстыру схемасының сызықтық бөлігінің беріліс функциясы үшін түзету коэффициенттерінің тәуелділіктері алынды.

Кілт сөздер: реттелетін тұрақты ток электр жетегі, басқарылатын генераторлық тежеу, сызықтық, имитациялық модельдеу, импульстік түрлендіргіш, динамикалық өнімділік.

Research of an Adjustable DC Electric Drive in the Generator Braking Mode

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

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

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

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

²***VOITKEVICH Sofya**, PhD, Acting Associate Professor, sofiya_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 DC electric drive with a compensated electric motor of independent excitation of the 4PF series in the mode of controlled generator braking. The linearization of the model is performed, a linear transfer function is obtained via the control channel. The dependences of the oscillation index and the time constant in the duty cycle function of the pulse converter in the braking mode are determined, the operating range of the braking mode is determined. As a result of theoretical studies, the operating range of the change in the duty cycle of the pulse converter in the armature circuit of the electric motor has been determined. The dependences of the correction coefficients for the transfer function of the linear part of the electric drive replacement circuit in the controlled dynamic braking mode are obtained, which allow taking into account the nonlinearity of the pulse converter.

Keywords: adjustable DC electric drive, controlled generator braking, linearization, simulation, pulse converter, dynamic characteristics.

REFERENCES

1. German-Galkin S.G. Silovaya e`lektronika: Laboratorny`e raboty` na PK. – SPb: KORONA print, 2007. 256 p.
2. Kaverin V.V. Regulirovochny`e karakteristiki e`lektroprivoda postoyannogo toka v rezhime dinamicheskogo tormozheniya // Tr. un-ta; KarGTU. Karaganda, 2009. No. 3. Pp. 77-79.
3. Kaverin V.V., E`m G.A. Imitacionnoe modelirovanie poluprovodnikovogo e`lektroprivoda postoyannogo toka // Tr. un-ta / KarGTU. Karaganda: Publ. KarGTU, 2010, pp. 96-99.
4. Komp`yuternoe modelirovanie i identifikaciya e`lektrotexnicheskix kompleksov: ucheb. posobie. V 3-x ch. Chast` 3 / B.N. Feshin, Yu.F. Bulatbaeva, G.S. Nurmaganbetova, G.I. Parshina, Sh.Z. Telbaeva; KarGTU. Karaganda: Publ. KarGTU, 2010. 63 p.
5. Bessekerskij V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Moscow: Nauka, 1972. 768 p.
6. Horovicz P., Xill U. Iskustvo sxemotexniki: V 2-x t. T. 1. / Per. s angl. Moscow: Mir, 1986. 598 p.
7. Trebovaniya k bezopasnosti processov razrabotki rudny`x, nerudny`x i rossy`pny`x mestorozhdenij otkry`ty`m sposobom. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P090001939>. Data poseshheniya: 24.11.2021g.
8. Pravila obespecheniya promy`shlennoj bezopasnosti dlya opasny`x proizvodstvenny`x ob`ektov, vedushhix gorny`e i geologorazvedochny`e raboty`. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1400010247>. Data poseshheniya: 24.11.2021g.
9. GOST 34434-2018 Tormozny`e sistemy` gruzovy`x zheleznodorozhny`x vagonov. Texnicheskie trebovaniya i pravila rascheta.
10. GOST 33597-2015 Tormozny`e sistemy` zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody` ispy`taniy.