

# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621. 3. 078

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

## ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

### Аннотация

**Постановка задачи:** в статье приводятся результаты исследования электромагнитных процессов в двигателях последовательного возбуждения при питании от статического преобразователя. Приведены полученные функциональные нелинейные зависимости параметров указанных систем от нагрузки на валу и скорости двигателя. Сформулирована актуальность проблемы учета нелинейных параметров при определении устойчивости системы в целом, а также при синтезе оптимальных управлений. **Цель работы:** функциональный и структурно-параметрический синтез управления на основе динамической коррекции движения системы, обеспечивающей как устойчивость, так и возможность оптимизации этого движения. **Используемые методы:** в работе был использован спектральный метод Соловьёвника, метод динамического программирования, моделирование в среде Matlab Simulink, а также экспериментальные исследования. **Новизна:** предложена нелинейная динамическая коррекция системы преобразователь-двигатель последовательного возбуждения на основе найденных функциональных зависимостей координат движения, обеспечивающая заданные динамические характеристики. **Результат:** в статье приведены данные о существенном влиянии (изменении параметров в 6–7 раз) текущей скорости двигателя. Приведены аппроксимированные зависимости (с погрешностью до 2%), позволяющие осуществить формирование корректирующего сигнала с помощью типовых линейных звеньев. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть полезны при разработке систем электропривода как электрифицированного инструмента, так и тяговых электроприводов для обеспечения оптимумов по быстродействию и минимума потерь в динамических режимах.

**Ключевые слова:** электромагнитный процесс, двигатель последовательного возбуждения, статический преобразователь, моделирование в среде Matlab Simulink.

### Введение

Проблематика управления двигателем последовательного возбуждения (ДПВ) с точки зрения оптимизации его энергетики до сегодняшнего дня остается актуальной для исследователей. Несмотря на широкое использование ДПВ от тягового электропривода до электрифицированного ручного инструмента и бытовой техники, теоретические изыскания крайне редки. Можно выделить труды российских ученых, посвященные развитию теоретических и практических аспектов улучшения энергетических показателей электроприводов с двигателем последовательного возбуждения: В.П. Климова, Н.Ф. Ильинского, В.Г. Кагана, Г.В. Лебедева, Л.И. Малинина, С.В. Власьевского, А.С. Мешкова, А.Е. Алексина, Ю.П. Петрова, М.Х. Беллмана, а также Т. Fujimaki, G.K. Dubey и других, которые справедливо замечают, что классические вариационные методы поиска оптимального управления ДПВ с точки зрения минимизации потерь не дают прямого решения.

### Синтез нелинейной динамической коррекции электропривода с ДПВ

Анализ динамических процессов в электроприводах с ДПВ показывает, что основной проблемой обеспечения оптимального закона управления, а также устойчивости системы является зависимость параметров системы от тока и, главным образом, от скорости двигателя. Указанные причины приводят к тому, что статические и динамические процессы в замкнутой системе электропривода с ДПВ зависят от режима работы. На эту проблему указывают ряд авторов [1–3]. Общим выводом является то, что для обеспечения устойчивости такой системы необходимо обеспечить нелинейную динамическую коррекцию. В работе [4] предложено ввести гибкую обратную связь в виде параллельного корректирующего звена на входе системы, имеющего передаточную функцию:

$$W_k(p) = \frac{A_k p T_{*k}}{1 + p T_{*k}}, \quad (1)$$

© Мин Ту Аунг, Суздорф В.И., 2018

где  $T_{*k}$ ,  $A_k$  – постоянная времени звена в рабочей точке и статический коэффициент передачи звена соответственно.

Целью введения такой коррекции является стабилизация частоты среза, которая связана с переменными параметрами следующим уравнением:

$$\omega_{* \text{среза}} = \frac{\sqrt{2} i_*}{A_k (R + k\omega_*)}, \quad (2)$$

где  $\omega_{* \text{среза}}$ ,  $i_*$ ,  $(R + k\omega_*)$  – частота среза, ток двигателя в рабочей точке, эквивалентное сопротивление цепи якоря двигателя, соответственно. Тогда для стабилизации частоты среза необходимо иметь зависимость:

$$A_k = \frac{A_{k0} i_*}{(R + k\omega_*)}, \quad (3)$$

где  $A_{k0}$  – параметр, соответствующий величине требуемого быстродействия системы.

Полученное выражение позволяет строить корректирующее звено с параметрами, зависимыми от текущего значения тока и скорости двигателя. При питании двигателя от статического преобразователя, особенно однофазного, очевидны проблемы введения регулирующих сигналов по указанным переменным: их пульсирующий характер, возможность режима прерывистого тока, трудности измерения скорости в случае значений больше  $4000 = 5000$  об/мин (характерно для приводов малой и микромощности с однофазными коллекторными двигателями). Между тем взаимное влияние рабочих характеристик и параметров привода позволяет трансформировать динамические функциональные зависимости системы в управляющие сигналы. В работе [5] показано, что «электромагнитная постоянная времени» функционально зависит от тока и скорости двигателя. Авторам удалось путем исследования электромагнитных процессов в системе электропривода с импульсно-фазовым управлением установить эти зависимости (рис. 1).

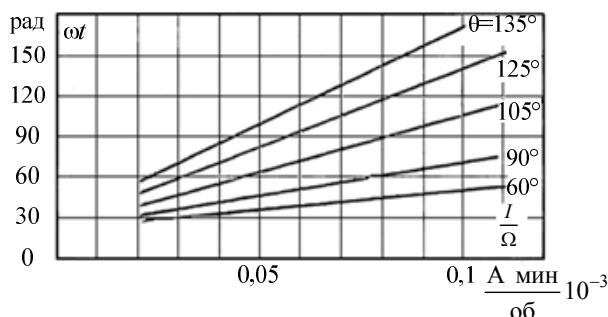


Рис. 1. Зависимость «электромагнитной постоянной времени» от рабочей точки движения

Согласно принципу взаимности изопериметрических задач, актуальным вопросом является синтез оптимального управления на основе метода динамического программирования и критерия быстродействия [6, 7, 9]. Полученные ранее результаты исследования позволили определить закон изменения напряжения на двигателе для предельного быстродействия. Сравнительные потери энергии ДПВ с оптимальным управлением и при прямом пуске показывали, что потребленная электрическая энергия отличается в 36 раз. Дальнейший анализ показал, что на интервале поддержания максимального значения тока (необходимо из условия быстродействия) закон управления может обеспечить ПИ-регулятор, однако длительность интервала нарастания тока при ограничении на напряжение питания нелинейно зависит от скорости двигателя и его нагрузки на валу (рис. 2). Электромагнитная составляющая переходного процесса имеет постоянную временем [11, 12]:

$T^* = T_s / (1 + k \Omega)$ , где  $T_s$  – электромагнитная постоянная обмоток двигателя (зависит только от индуктивности и активного сопротивления обмоток двигателя),  $\Omega$  – скорость вращения вала, а  $k$  – коэффициент, учитывающий коэффициент ЭДС якоря и аппроксимирующую кривую намагничивания. Решением уравнения электрического равновесия для ДПВ является выражение

$$i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T^*}} \right),$$

где  $U$  – напряжение питания двигателя, а  $R$  – сопротивление обмоток двигателя.

Заменяя экспоненту степенным рядом, получим для первых двух членов (учитывая, что ток растет лишь до значения  $I_{max}$ , заданного ограничением по алгоритму на рис. 1, который меньше, чем  $U/R$ ). Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$i(t) = \frac{U_{max}}{R} \left( t - \left( t - \frac{t}{T^*} \right) \right) = \frac{U_{max}}{R} \frac{t}{T^*},$$

откуда, с учетом, что  $i(t) = I_{max}$ , получим для времени нарастания тока  $t_p$  и, следовательно, поддержания максимального значения напряжения  $U_{max}$  на двигателе:

$$t_p = \frac{I_{max}}{U_{max}} \frac{R}{U_{max}} \frac{T^*}{U_{max}}.$$

**Рис. 2** демонстрирует зависимость электромагнитных процессов от величины скорости и тока. Найденные зависимости (см. **рис. 1**) позволяют упростить математическое описание движения системы, состоящей из ДПВ и статического преобразователя, и использовать известные пакеты моделирования, например Matlab Simulink.

Исходя из приведенных соображений, электромагнитную постоянную времени можно определить двумя способами: прямым расчетом или измеряя темп спадания тока самоиндукции в момент, когда фаза напряжения больше 180 эл. градусов для тиристорного преобразователя. Для выделения сигнала, пропорционального этой постоянной, используется блок обнуляемого дискретного интегратора. На **рис. 3** представлен блок измерения темпа спадания ЭДС двигателя последовательного возбуждения.

На **рис. 4** изображена модель однофазного мостового нереверсивного тиристорного пре-

образователя. Источник питания частотой 50 Гц *AC voltage source* обеспечивает амплитуду напряжения в 220 В. Управление выходным напряжением обеспечивается тиристорным преобразователем *Universal Bridge*, который реализован на основе импульсно-фазового управления SIFU [6].

На **рис. 5** показана разработанная схема модели электропривода. Задающий сигнал *Signal Builder* через блок ограничения *Saturation Dynamic* задает ток двигателя. Максимальное значение тока двигателя задано на уровне 6 А.

На **рис. 6** приведена принципиальная электрическая схема электропривода с каналом динамической коррекции на основе обнуляемого дискретного интегратора для реализации физического эксперимента, а на **рис. 7** – осциллограммы обнуляемого дискретного интегратора.

На **рис. 8** представлены результаты моделирования метода управления двигателем последовательного возбуждения.

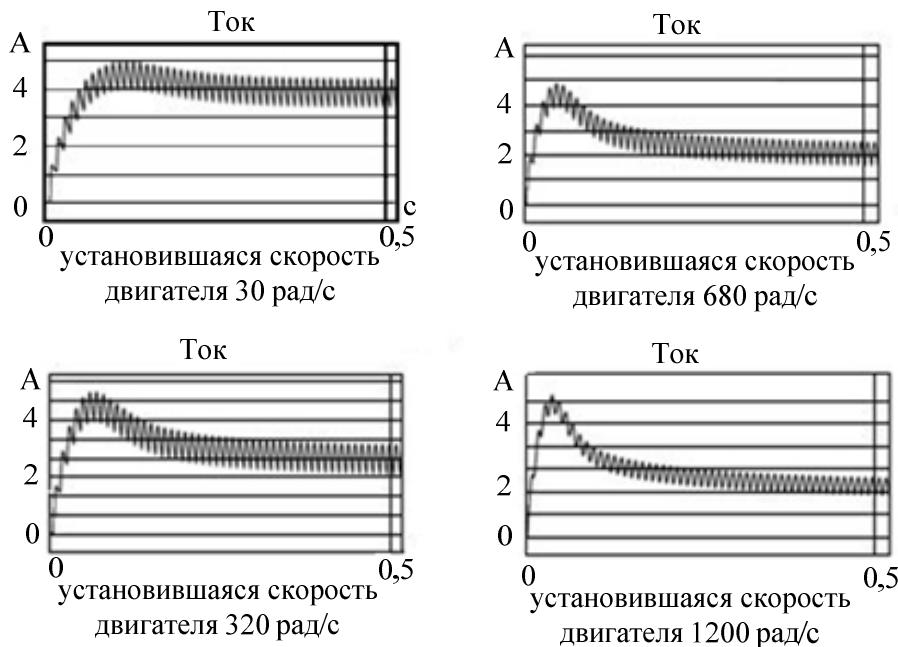


Рис. 2. Кривые переходного процесса по току двигателя при отработке ступеньки управляющего воздействия

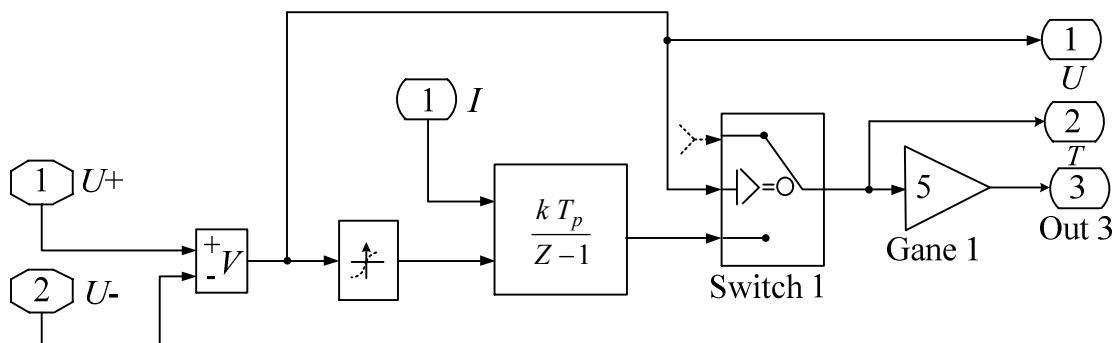


Рис. 3. Блок измерения темпа спадания ЭДС самоиндукции ДПВ

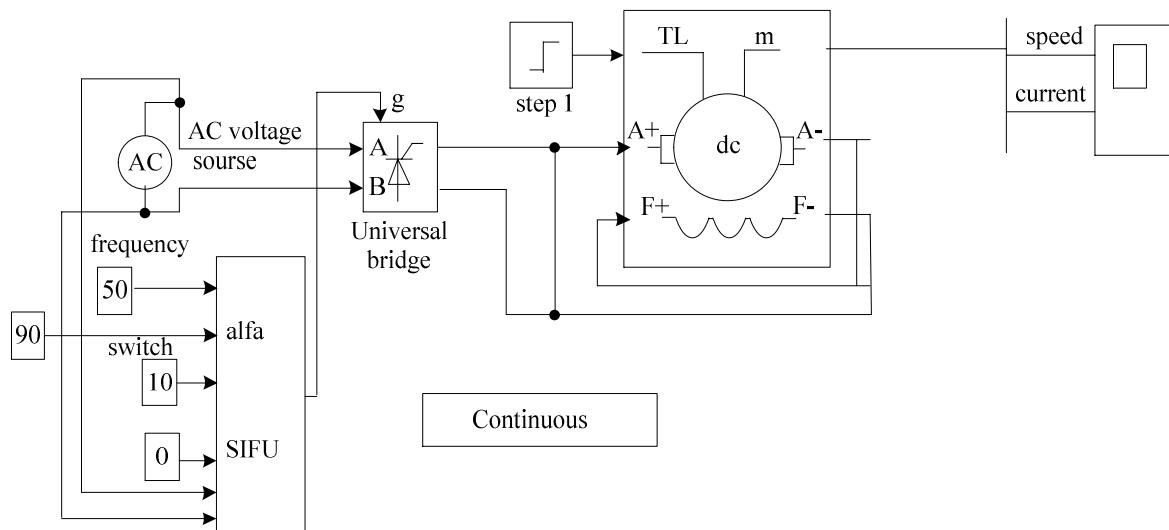


Рис. 4. Нереверсивный однофазный тиристорный преобразователь

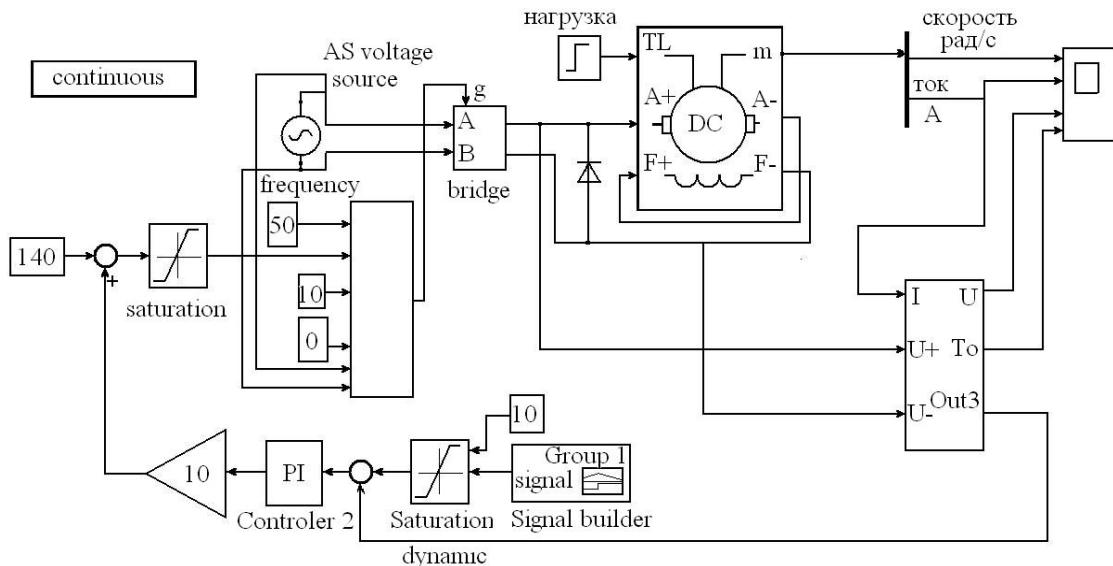


Рис. 5. Схема модели управления двигателем последовательного возбуждения

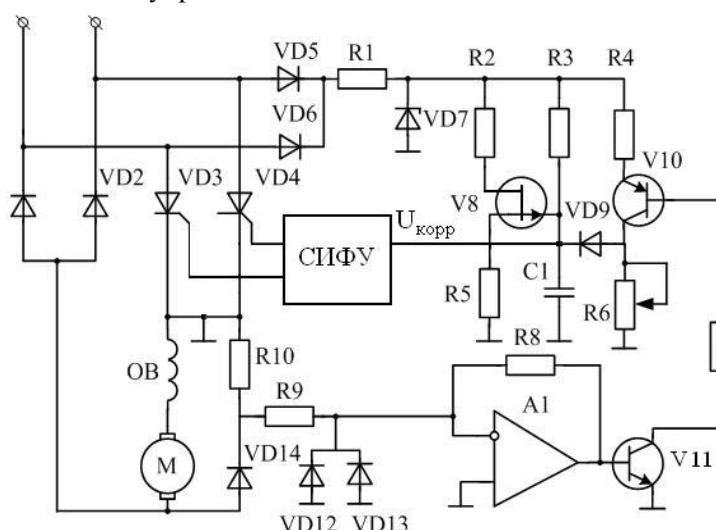


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема обнуляемого дискретного интегратора, выполненная на операционном усилителе A1, транзисторах V10, V11 и конденсаторе C1

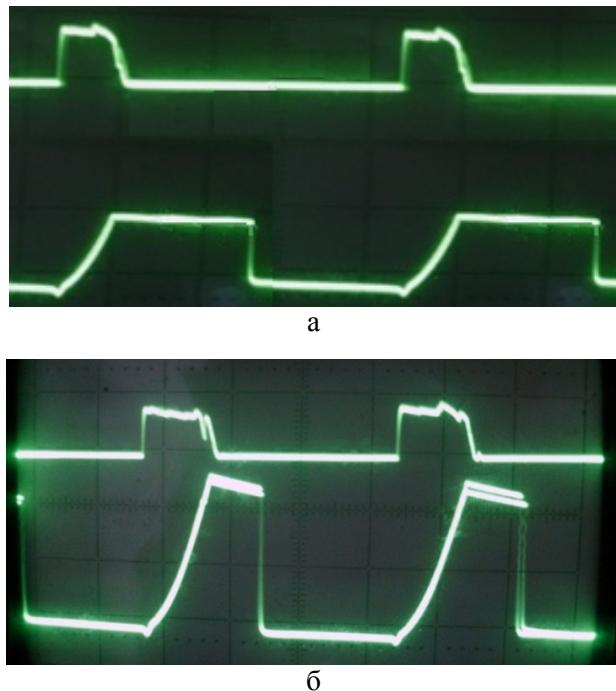


Рис. 7. Осциллографмы обнуляемого дискретного интегратора, снятые для двух значений скорости двигателя: 400 (а) и 800 рад/с (б). Получены для двигателя серии КОО 651. Верхние импульсы на входе компаратора А1, нижние – на конденсаторе С1

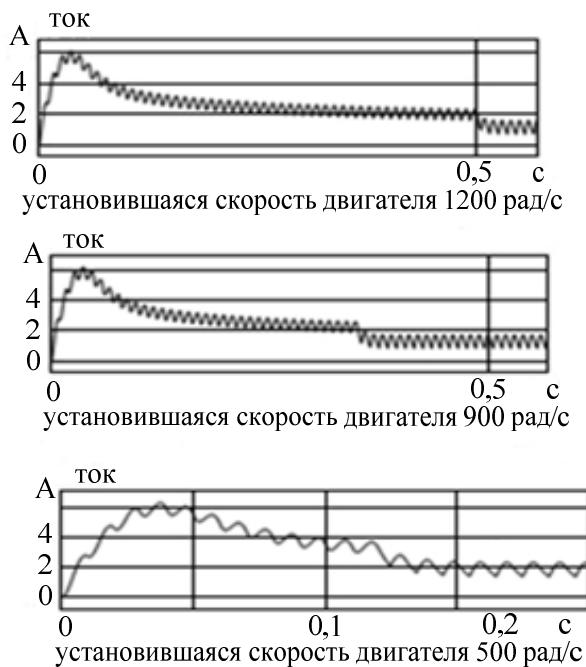


Рис. 8. Результаты моделирования метода управления ДПВ

Легко увидеть, что для всех значений скорости время реакции по току двигателя одинаково (на рис. 8 четко просматривается по 4 пульса

тока на каждой из кривых). Таким образом, введенный в закон управления корректирующий сигнал стабилизирует динамические свойства системы, скорость нарастания тока теперь зависит только от величины токоограничения и допустимого темпа его нарастания исходя из требования коммутации коллекторно-щеточного узла. Полученная коррекция делает возможным обеспечение оптимального управления приводом для всех режимов работы.

Линейность полученных зависимостей позволяет относительно простую реализацию управлений, что демонстрируется схемой, приведенной на рис. 6.

### Заключение

В результате исследования электромагнитных процессов выявлено:

- электромагнитная постоянная времени может изменяться до 8 раз в диапазоне регулирования скорости;
- из-за дискретности управления двигателем, при наличии преобразователя, необходима коррекция закона управления и его рациональная аппроксимация.

Получены аппроксимирующие зависимости между скоростью нарастания тока и скоростью вращения вала двигателя, что упрощает синтез корректирующего сигнала для управления динамикой по оптимальным траекториям в различных режимах работы ДПВ.

Предложена нелинейная динамическая коррекция управления с функциональной зависимостью от скорости двигателя, стабилизирующая динамику электропривода.

### Список литературы

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. М.: Госэнергоиздат, 1961. 188 с.
2. Повышение энергетической эффективности медицинских инструментов и приборов / Дементьев Ю.Н., Кафташев Д.А., Мешков А.С., Суздорф В.И. // Интеллектуальные энергосистемы: труды II Международного молодежного форума. Томск, 2014. С. 103–110.
3. Мешков А.С., Суздорф В.И. Энергоэффективный электрифицированный инструмент // Сб. научно-исследовательских работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. Новочеркасск: Лик, 2010. С. 49–53.
4. Каган В.Г., Лебедев Г.В., Малинин Л.И. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения. М.: Энергия, 1971. 96 с.
5. Min Tu Aung Energy Saving Control of Series Excitation Motor / V.I. Susdorf, Y.N. Dementyev, K.N. Negodin, Min Tu Aung // MATEC Web Conf. 91 01045 (2017)

6. Алехин А.Е., Дементьев Ю.Н., Суздорф В.И. Электропривод постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения: пат. 1676418 RUS, 06.02.1990.
7. Беллман М.Х. Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании. Л.: Энергия, 1975. 134 с.
8. Susdorf V.I. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices / Meshkov A.S, Susdorf V.I., Dementyev Y. N., D.A. // The 2<sup>nd</sup> International Youth Forum "Smart Grids", MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014.
9. Мешков А.С., Суздорф В.И., Гринкруг М.С. Формирование характеристик электроприводов малой мощности // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2014. №4(17). С. 61–71
10. Мешков А.С., Суздорф В.И. Электропривод малой мощности с улучшенными энергетическими характеристиками // Вестник ТОГУ. 2013. №1(28). С. 115–124.
11. Мешков А.С., Суздорф В.И. Устройство для стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя: пат. 2444838 Российская Федерация, МПК H02P7/29. Опубл. 10.03.2012.

Поступила 13.11.17.  
Принята в печать 01.02.18.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

## DYNAMIC CORRECTION OF ELECTRIC DRIVES WITH SERIES MOTORS

**Min Thu Aung** – Postgraduate Student  
 Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail:  
 minthuaung000370@gmail.com.

**Viktor I. Suzdorf** – Ph.D. (Eng.), Professor  
 Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: susdorf@mail.ru.

### Abstract

**Problem Statement:** This article describes the results of a study into the electromagnetic processes that take place in series motors energized from static inverters. The article also describes the nonlinear functional dependences obtained between the parameters of the mentioned systems and the shaft load and the motor speed. The authors point out why it is important to account for the nonlinear parameters when determining the overall stability of the system and when combining optimal controls. **Objectives:** The objectives include a functional and parametric synthesis of controls based on dynamic correction of the system ensuring stability and enabling system optimization. **Methods Applied:** The methods used in this study include a spectral method by Solodovnikov, a dynamic programming method, Matlab Simulink simulation, as well as experimental studies. **Originality:** The authors propose a nonlinear dynamic correction technique for the ‘inverter-series motor’ system. The technique is based on the functional dependencies of the system coordinates and ensures that the preset dynamic characteristics are reached. **Findings:** The article contains data indicating a significant impact (causing a 6 to 7 times change in the parameters) produced by the current motor speed. There are also given approximated dependences (with an error of up to 2%) which help form a correction signal using standard linear circuits. **Practical Relevance:** The results of the study can be useful in the development of electric drive systems for application in electric tools and traction motors, as they can help ensure optimum performance and minimum losses in dynamic modes.

**Keywords:** Electromagnetic process, series motor, static inverter, Matlab Simulink simulation.

### References

1. Petrov Yu.P. *Optimalnoe upravlenie elektroprivodom [Optimal actuator]*. Moscow: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1961, 188 p. (In Russ.)
2. Dementiev Yu.N., Kaftasiev D.A., Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Improved energy efficiency of medical instruments and devices. V sbornike: *Intellektualnye energosistemy. Trudy II Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma [Smart grids. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Youth Forum]*. 2014, pp. 103-110. (In Russ.)
3. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Energy efficiency electric tools. Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot finalistov konkursa aspirantov i molodykh uchenykh v oblasti energosberezeniya v promyshlennosti [Proceedings of the final competition among students and young researchers who study energy efficiency in industrial applications]. Novocherkassk: Lik, 2010, pp. 49-53. (In Russ.)
4. Kagan V.G., Lebedev G.V., Malinin L.I. Semiconductor systems with series motors. Moscow: Energiya, 1971, 96 p. (In Russ.)
5. Susdorf V. I., Dementiev Y. N., Negodin K. N., Min Aung Tu. Energy Saving Control of Series Excitation Motor. MATEC Web Conf. 91 01045 (2017)
6. Dementiev Yu.N., Kaftasiev D.A., Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Smart grids. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Youth Forum, 2014, pp. 103-110.
7. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Energy efficiency electric tools. Sb.

- nauchno-issledovatel'skikh rabot finalistov konkursa aspirantov i molodykh uchenykh v oblasti energosberezheniya v promyshlennosti* [Proceedings of the final competition among students and young researchers who study energy efficiency in industrial applications], Novocherkassk: Lik, 2010, pp. 49-53. (In Russ.)
8. Alekhin A.E., Dementiev Yu.N., Suzdorf V.I. *Elektroprivod postoyannogo toka s dvigatelyem posledovatelnogo vozobuzhdeniya* [DC drive with a series motor]. Patent RF, no. 1676418, 1990.
9. Bellman M.Kh. *Perekhodnye protsessy v mikrodvigatelyakh postoyannogo toka pri impulsnom pitanii* [Transients in the DC micro motors with pulse power. Leningrad: Energy, 1975. 134 p. (In Russ.)
10. Meshkov A.S., Suzdorf V.I., Dementiev N.Y., Kartashev D.A. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices. The 2nd International Youth Forum "Smart Grids", MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014. (In Russ.)
11. Meshkov A.S., Suzdorf V.I., Grinkrug M.S. Shaping the characteristics of low power drives. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholem-Aleykhema* [Bulletin of the Sholem Aleichem Amur State University], 2014, no. 4(17), pp. 61-71
12. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Low power electric drive with improved energy efficiency. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific National University], 2013, no. 1(28), pp. 115 – 124.
13. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. *Ustroystvo dlya stabilizatsii chastoty vrashcheniya odnofaznogo kollektornogo elektdrovigatelya* [Single-phase commutator motor speed stabiliser]. Patent RF, no. 2444838, 2012.

Received 13/11/17

Accepted 01/02/18

---

**Образец для цитирования**

Мин Ту Аунг, Суздорф В.И. Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

**For citation**

Min Thu Aung, Suzdorf V.I. Dynamic correction of electric drives with series motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 54–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60>

---