

УДК 621.313.333

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ТОРМОЗНЫМ УСТРОЙСТВОМ

В. В. БРЕЛЬ, В. В. ЛОГВИН

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Недостатком работы асинхронного двигателя (АД) с электромеханическим тормозом является частый износ фрикционных накладок и необходимость их замены. Решает данную проблему конструкция АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ). Эффективность использования конструкции определяется сравнением различных способов торможения электроприводов по их тормозным показателям: времени торможения и пути торможения. Сравнение производится для электроприводов с частыми пуско-тормозными режимами, использующих динамическое торможение АД с фазным ротором, АД с короткозамкнутым ротором и механическое торможение АД. При торможении АД с ВКТУ также важным параметром является износ фрикционных накладок, что влияет на длительность бесперебойной работы электропривода. Торможение на пониженных скоростях существенно уменьшает износ фрикционных накладок электромеханического тормоза. Сделаны выводы, что для большинства электроприводов с частыми пуско-тормозными режимами тормозные показатели АД с ВКТУ являются допустимыми при $\omega_{\text{вкл}} = (0,6 \div 0,7) \omega_{\text{ном}}$. Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных результатов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, встраиваемый электромеханический тормоз, способы торможения электроприводов, переходные процессы, износ фрикционных накладок, время и путь торможения электроприводов.

TRANSIENTS IN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH BRAKING DEVICE

V. V. BREL, V. V. LOGVIN

Educational institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus

The disadvantage of the operation of an asynchronous motor (AD) with an electromechanical brake is the frequent wear of friction pads and the need to replace them. This problem is solved by the design of an AD with an integrated combined braking device (AD with an BCBD). The efficiency of using the structure is determined by comparing various methods of braking electric drives by their braking indicators: braking time and braking path. The comparison is made for electric drives with frequent start-up and braking modes using dynamic braking of BP with a phase rotor, BP with a short-circuited rotor and during mechanical braking of BP. When braking AD with HCO, wear of friction pads is also an important parameter, which affects the duration of uninterrupted operation of the electric drive. Braking at reduced speeds significantly reduces the wear of the friction pads of the electromechanical brake. It was concluded that for most electric drives with frequent start-up and brake modes, the braking parameters of AD with BCBD are permissible at $\omega_{\text{switching on}} = (0,6 \div 0,7) \omega_{\text{nominal}}$. Experimental studies confirmed the correctness of the results obtained.

Keywords: asynchronous motor, built-in electromechanical brake, methods of braking electric drives, transient processes, wear of friction pads, time and path of braking electric drives.

Введение

В 50–60 гг. прошлого столетия получили широкое распространение асинхронные двигатели (АД) с электромеханическим тормозом. Причиной их распространения стали дешевизна и простота конструкции тормоза, а также наиболее быстрое торможение по сравнению с другими распространенными способами торможения [1]–[4].

Недостатками работы АД с электромеханическим тормозом при частых пуско-тормозных режимах являются периодический износ фрикционных накладок и необходимость частой их замены [5]–[7]. Решает данную проблему конструкция АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ) [8].

Схема АД с ВКТУ представлена на рис. 1.

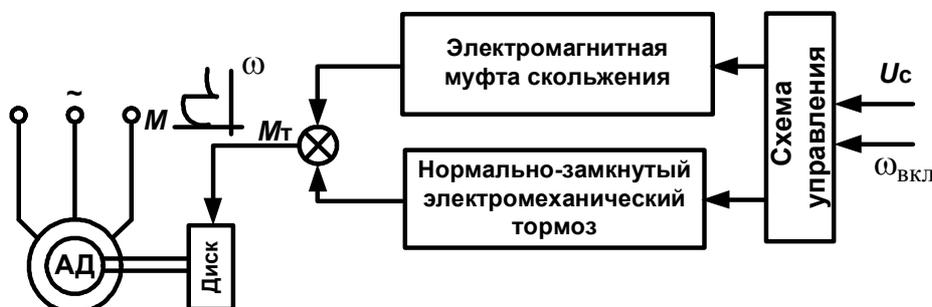


Рис. 1. Схема АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством

Механическая характеристика АД с ВКТУ формируется следующим образом. После отключения электропривода от питающей сети схема управления подает напряжение на электромагнитную муфту скольжения. АД начинает тормозиться электромагнитным полем. Скорость вала в процессе торможения замедляется и при достижении заданной скорости включения $\omega_{\text{вкл}}$ схема управления подает сигнал на размыкание электромеханического тормоза. На вал двигателя начинает действовать суммарный тормозной момент от электромагнитной муфты и от электромеханического тормоза. Скорость включения $\omega_{\text{вкл}}$ определяется необходимой механической характеристикой электропривода и задается изначально в схеме управления [9], [10].

Достоинствами предложенной конструкции АД с ВКТУ являются:

1. Плавность торможения за счет использования электромагнитной муфты скольжения, обладающей мягкой тормозной характеристикой.

2. Повышенная износостойкость фрикционных накладок тормоза за счет того, что механическое торможение происходит на пониженной скорости. Допустимое число торможений обратно пропорционально квадрату изменения частоты вращения ротора в начале торможения [1], т. е. если частоту вращения ротора в начале торможения для электромеханического тормоза уменьшить в полтора раза (т. е. $\omega_{\text{вкл}} = 0,67 \cdot \omega_{\text{н}}$), то допустимое число торможений для фрикционной накладки увеличится в 2,25 раза.

3. Возможность встраивания конструкции электромагнитной муфты и электромеханического тормоза в базовый общепромышленный АД.

Целью данной работы является определение эффективности использования конструкции АД с ВКТУ, а именно – сравнение различных способов торможения электроприводов с частыми пуско-тормозными режимами по их переходным процессам.

Основная часть

Для определения эффективности использования АД с ВКТУ в промышленности необходимо сравнить различные способы торможения электроприводов по их тормозным показателям: времени торможения t и пути торможения φ . Сравнение необходимо производить для электроприводов с частыми пуско-тормозными режимами, использующих динамическое торможение АД с ФР (фазным ротором), АД с КР (короткозамкнутым ротором), при механическом торможении АД и для АД с ВКТУ [10].

Расчет времени t и пути торможения φ электроприводов будем вести на основании математической модели, полученной в [9]. В данной работе используется система базисных величин, рекомендованная в [11]. При этом необходимые уравнения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\alpha}^\circ - \alpha'_s \psi_{s\alpha}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{r\alpha}^\circ - \frac{2}{3} u_s^\circ; \\ \frac{d\psi_{s\beta}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\beta}^\circ - \alpha'_s \psi_{s\beta}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{r\alpha}^\circ + \alpha'_r k_s \psi_{s\alpha}^\circ - \omega_p^\circ \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{r\beta}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{r\beta}^\circ - \alpha'_r k_s \psi_{s\beta}^\circ + \omega_p^\circ \psi_{r\alpha}^\circ; \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{d\omega_p^\circ}{dt^\circ} = \frac{1}{H} \left[M^\circ - (M_c^\circ + M_T^\circ \cdot 1t_{\text{тр}} + M_M^\circ(\omega_p^\circ)) \text{sign} \omega_p \right];$$

$$H = \frac{33,79 J n_1^2}{S_{\text{баз}}};$$

$$M^\circ = \frac{k_r}{\sigma x_s^\circ} (\psi_{r\alpha}^\circ \psi_{s\beta}^\circ - \psi_{s\alpha}^\circ \psi_{r\beta}^\circ),$$

где H – момент инерции в относительных единицах, M_c° – статический момент со-противления в относительных единицах; M_T° – тормозной момент в относительных единицах, возникающий в результате трения фрикционных накладок тормозного устройства (электромеханический тормоз); $M_M^\circ(\omega_p^\circ)$ – тормозной момент электромагнитной муфты скольжения (электромагнитный тормоз) в относительных единицах; $S_{\text{баз}}$ – номинальная полная мощность двигателя, В · А;

Математическое моделирование для исследования осуществлялось на языке программирования FF 2018.

При торможении АД с ВКТУ важным параметром является износ фрикционных накладок, что влияет на длительность бесперебойной работы электропривода. Торможение на пониженных скоростях существенно уменьшает износ фрикционных накладок электромеханического тормоза. Поэтому проанализируем и произведем выбор оптимального значения скорости включения $\omega_{\text{вкл}}$, при которой имеет место пониженный износ и плавность торможения в АД с ВКТУ и обеспечивается быстрая, точная остановка электропривода.

Характер переходных процессов для различных способов торможения показан на рис. 2–5.

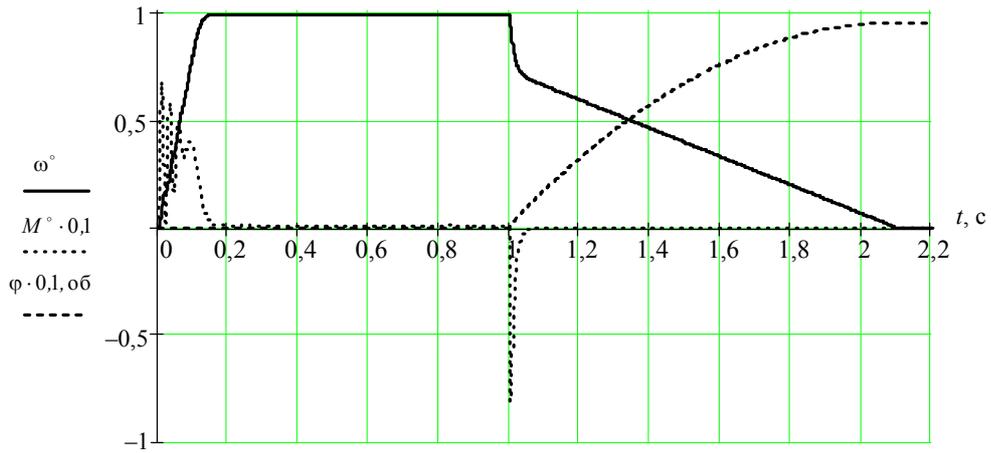


Рис. 2. Пуск и динамическое торможение асинхронного двигателя с фазным ротором

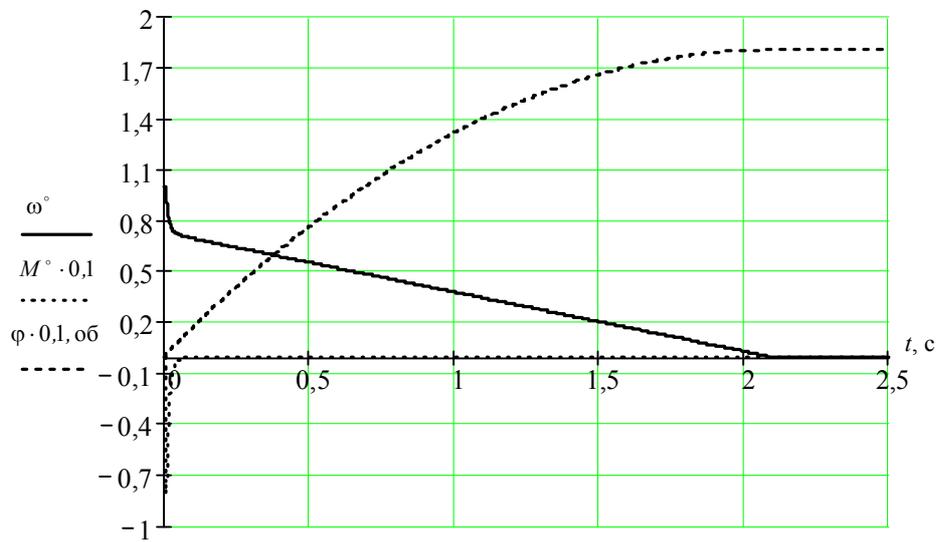


Рис. 3. Динамическое торможение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

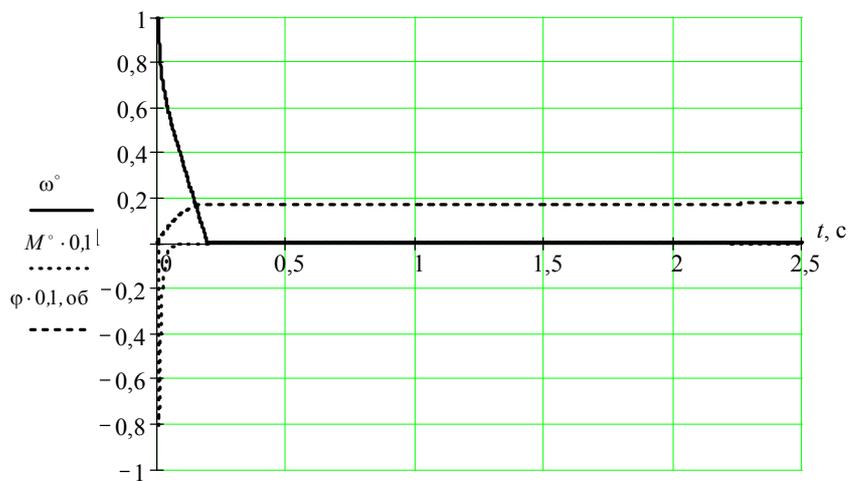


Рис. 4. Механическое торможение асинхронного двигателя

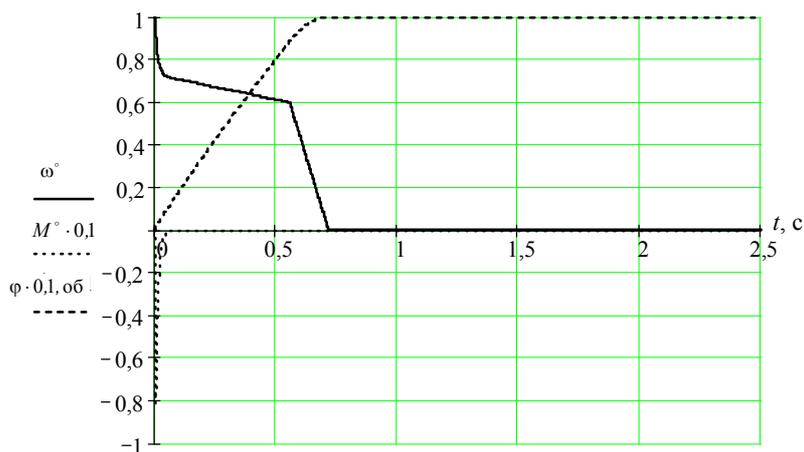


Рис. 5. Торможение асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством

Был изготовлен стенд для экспериментального исследования переходных процессов, протекающих в АД с ВКТУ. Структурная схема стенда представлена на рис. 6.

Стенд состоит из ПЭВМ (Intel 2.2GHz), цифрового датчика пути и блока сопряжения между ними. Он позволяет измерять путь торможения, время торможения и скорость вращения вала двигателя в конкретный момент времени.



Рис. 6. Структурная схема стенда

На вал исследуемого АД с ВКТУ, подключенного к сети через магнитный пускатель, монтируется диск с отверстиями. Отверстия размещают между фотоэлементами цифрового датчика пути.

От схемы управления к блоку сопряжения подводятся контакты, определяющие момент отключения двигателя от сети. Для передачи данных используется интерфейс RS-232C. Каждый импульс датчика пути формирует в блоке сопряжения пакет из 5 байт, который передается на ПЭВМ. Максимальная частота опроса датчика пути – 100 Гц. Это позволяет даже при минимальном переходном процессе торможения получать график с двадцатью экспериментальными точками. От ПЭВМ к схеме управления АД с ВКТУ подведены управляющие контакты.

Стенд работает следующим образом: подается напряжение на АД с ВКТУ, схема управления растормаживает электромеханический тормоз, вал начинает вращаться. После того как двигатель выйдет на номинальный режим, оператор отключает напряжение. В этот момент на блок сопряжения от схемы управления приходит сигнал начала отсчета количества оборотов. Блок сопряжения начинает передавать пакеты данных на ПЭВМ. Программа, разработанная на базе программного обеспечения Borland Delphi, анализирует полученные пакеты. В момент отключения питания в ней запускается таймер (блоком сопряжения), и начинается отсчет времени с фиксацией приходящих пакетов в различные промежутки времени.

Таким образом, программа получает массив данных, в котором содержится количество оборотов и время, за которое они совершены. Далее программа в реальном времени рассчитывает значение мгновенной скорости. При достижении скорости включения $\omega_{вкл}$ программа генерирует на выходе спикера ПЭВМ повышенное напряжение, которое поступает на схему управления АД с ВКТУ и является сигналом к включению электромеханического тормоза.

Задаваясь различными значениями $\omega_{вкл}$, можно экспериментально исследовать все электромеханические кривые торможения. Стенд возможно использовать для исследования АД с ВКТУ различной мощности.

Исследования проводились при различном моменте инерции электропривода и различной нагрузке на валу. Полученные данные сведены в табл. 1–3 ($K_{кр}$ – максимальная кратность тормозного момента к номинальному; $I_{с.х}$ – трехфазный ток статора холостого хода).

Таблица 1

Сравнение времени и пути торможения при $I_{в} = 3I_{с.х}$; $J_{мех} = 2J_{рот}$; $M_c = 0,1M_n$

Двигатель АИР90L4 (2,2 кВт, 1420 об/мин)	Сопротивление цепи ротора	Путь торможения, об	Время торможения, с
АД с ФР (динамическое торможение)	$0,4R_{р.н}$	9,6	1,1
АД с КР (динамическое торможение)	Внутреннее сопротивление ротора	18	2,0
Механическое торможение АД ($K_{кр} = 1,5$)	–	1,75	0,19
АД с ВКТУ ($\omega_{вкл} = 0,6 \cdot \omega_{ном}$)	–	10	0,71

Таблица 2

Сравнение времени и пути торможения при $I_{в} = 3I_{с.х}$; $J_{мех} = 3J_{рот}$; $M_c = 0,1M_n$

Двигатель АИР90L4 (2,2 кВт, 1420 об/мин)	Сопротивление цепи ротора	Путь торможения, об	Время торможения, с
АД с ФР (динамическое торможение)	$0,4R_{р.н}$	18,3	1,85
АД с КР (динамическое торможение)	Внутреннее сопротивление ротора	34,7	3,5
Механическое торможение АД ($K_{кр} = 1,5$)	–	3,28	0,32
АД с ВКТУ ($\omega_{вкл} = 0,6 \cdot \omega_{ном}$)	–	26,4	1,69
АД с ВКТУ ($\omega_{вкл} = 0,7 \cdot \omega_{ном}$)	–	17,1	1,09

Сравнение времени и пути торможения при $I_{\text{в}} = 3I_{\text{с.х}}; J_{\text{мех}} = 3J_{\text{рот}}; M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$

Двигатель АИР90L4 (2,2 кВт, 1420 об/мин)	Сопротивление цепи ротора	Путь торможения, об	Время торможения, с
АД с ФР (динамическое торможение)	$0,4R_{\text{р.н}}$	4,25	0,43
АД с КР (динамическое торможение)	Внутреннее сопротивление ротора	4,78	0,48
Механическое торможение АД ($K_{\text{кр}} = 1,5$)	–	2,0	0,2
АД с ВКТУ ($\omega_{\text{вкл}} = 0,6 \cdot \omega_{\text{ном}}$)	–	3,38	0,28

Анализ табл. 1 и 3 показывает, что при включении электромеханического тормоза на скорости $\omega_{\text{вкл}} = 0,6 \cdot \omega_{\text{ном}}$ АД с ВКТУ ни чем не уступает по тормозным показателям торможению АД с ФР и АД с КР, но проигрывает механическому способу торможения АД. Однако в сравнении с механическим способом торможения длительность бесперебойной работы АД с ВКТУ в 2,8 раза выше, и при этом отсутствуют большие динамические удары при торможении.

В табл. 2 проанализировано, что при включении электромеханического тормоза на скорости $\omega_{\text{вкл}} = 0,6 \cdot \omega_{\text{ном}}$ АД с ВКТУ уступает по тормозным показателям торможению АД с ФР и механическому способу торможения АД. Однако при $\omega_{\text{вкл}} = 0,7 \cdot \omega_{\text{ном}}$ АД с ВКТУ не уступает АД с ФР. При этом в сравнении с механическим способом торможения длительность бесперебойной работы АД с ВКТУ в 2 раза выше, и здесь отсутствуют большие динамические удары при торможении.

Сравнивая АД с ВКТУ с динамическим торможением АД с КР, видно, что АД с ВКТУ обладает существенно лучшими показателями торможения по сравнению с динамическим торможением АД с КР. Также в электроприводах с частыми пуско-тормозными режимами динамическое торможение может привести к недопустимому перегреву электродвигателя. Конструкция АД с ВКТУ не имеет такого недостатка.

Заключение

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать выводы, что для большинства электроприводов с частыми пуско-тормозными режимами тормозные показатели АД с ВКТУ являются допустимыми при $\omega_{\text{вкл}} = (0,6 \div 0,7)\omega_{\text{ном}}$. Следовательно, АД с ВКТУ является альтернативой широко распространенному динамическому торможению в АД с ФР и АД с КР малой и средней мощности, при чем там, где используется динамическое торможение АД с КР, существенно лучше применять АД с ВКТУ. Экспериментальные исследования влияния разных моментов на переходные процессы в АД с тормозным устройством подтвердили правильность полученных математических моделей и выводов.

Литература

1. Александров, М. П. Тормозные устройства / М. П. Александров, А. Г. Лысяков. – М. : Машиностроение, 1985. – 312 с.
2. Молчанов, Ю. М. Электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом / Ю. М. Молчанов. – М. : ИНФОРМЭЛЕКТРО, 1969. – 61 с.

3. Гусельников, Э. М. Самотормозящиеся электродвигатели / Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. – М. : Энергия, 1971. – 96 с.
4. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany) / E. Karl // Directory electromagnetic techniques. – 2015. – № 8. – Режим доступа: <http://www.keb.de>. – Дата доступа: 16.10.2015.
5. Фираго, Б. И. Синтез системы скалярного управления асинхронным электроприводом / Б. И. Фираго, О. Ф. Опейко // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2007. – № 5. – С. 26–37.
6. Karl, E. Brinkmann GmbH. COMBISTOP KEB (Germany) / E. Karl // Directory electromagnetic techniques. – 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://www.keb.de>. – Дата доступа: 01.12.2010.
7. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology (Germany) / E. Karl // Directory electromagnetic techniques. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://www.keb.de>. – Дата доступа: 01.09.2014.
8. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2011. – № 6. – С. 20–26.
9. Соленков, В. В. Математическая модель АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством / В. В. Соленков, В. В. Брель // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 24–31.
10. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – М. : Энергия, 1977. – 432 с.
11. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / А. В. Сипайлов, А. В. Лоос. – М. : Высш. шк., 1980. – 176 с.

Получено 30.06.2022