

DOI: 10.53078/20778481_2021_3_117

УДК 62-83:621

А. С. Коваль

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИФТА С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОТЕРЬ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

A. S. Koval

ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE FOR ELEVATORS WITH MINIMIZATION OF STEADY- STATE LOSSES

Аннотация

На основе модели мощности переменных потерь и использования выражения оптимального тока намагничивания как функции от параметров двигателя предложен алгоритм и система автоматического регулирования (САУ) асинхронным электроприводом лифта, позволяющая оптимизировать потери в двигателе в установившихся двигательных режимах работы двигателя при нагрузках, отличающихся от номинальной. Представлены результаты моделирования работы электропривода по разработанной модели.

Ключевые слова:

асинхронный двигатель с короткозамкнутым (к. з.) ротором, электропривод лифта, регулирование потока, переменные потери, оптимальный ток намагничивания, графики изменения момента, скорости, тока и потока.

Для цитирования:

Коваль, А. С. Асинхронный электропривод лифта с минимизацией потерь в установившихся режимах работы / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3(72). – С. 117–124

Abstract

Based on the variable losses power model and the use of the expression of optimal magnetizing current as a function of the motor parameters, an algorithm and an automatic control system (ACS) for the elevator's asynchronous electric drive are proposed, allowing optimization of the motor losses in steady-state modes of motor operation under loads that differ from the nominal one. The results of simulating electric drive operation according to the model developed are presented.

Keywords:

asynchronous motor with a short-circuited rotor, elevator electric drive, flux control, variable losses, optimal magnetizing current, graphs of torque, speed, current and flux change.

For citation:

Koval, A. S. Asynchronous electric drive for elevators with minimization of steady-state losses / A. S. Koval // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 3(72). – P. 117–124.

Оптимальное энергосберегающее управление в системах асинхронного электропривода переменного тока свя-

зано с регулированием потока двигателей. Тематика энергоэффективного управления асинхронными электродви-

гателями достаточно широка и определяется применением асинхронного электропривода в различных сферах деятельности [1, 2]. В частотно-регулируемом электроприводе переменного тока энергоэффективность связана с потерями и в двигателе, и в частотном преобразователе. Оптимумы минимизации мощности потерь в двигателе и минимизации мощности потерь во всей системе привода практически равнозначны с энергетической точки зрения [1, 2]. Соответственно, учет потерь в преобразователе не дает существенно лучшего результата минимизации энергопотребления в электроприводе по сравнению с учетом только мощности потерь в двигателе для асинхронных двигателей малого и среднего диапазона номинальных мощностей [1, 2]. Сама же формулировка задачи оптимизации энергоэффективности асинхронного электродвигателя зависит как от режимов работы (установившиеся, динамические), так и от характера изменения нагрузки на валу двигателя.

Оптимизация энергопотребления в динамических режимах – задача нетривиальная, но в настоящее время с учетом вычислительных возможностей управляющих контроллеров возможно её решение и в реальном времени.

Для установившихся режимов с постоянной, но отличающейся от номинальной нагрузкой на валу двигателя минимизация тока статора асинхронного двигателя приводит к минимизации потерь, т. к. потери в двигателе складываются из разных составляющих, но в первую очередь – это переменные потери в обмотках статора и ротора, определяемые током двигателя. Основные методы, минимизирующие ток статора в установившихся режимах [3], – это:

- методы управления, делающие максимальным отношение момент – ток (*maximum torque per ampere*) двигателя;

- методы на основе модели мощности потерь, использующие выражение оптимального тока намагничивания как

функцию от параметров и состояния двигателя;

- методы, базирующиеся на подходе к минимизации потребляемой мощности как к задаче численной оптимизации, где целевой функцией выступает измеряемое значение потребляемой мощности, минимум которой ищется в реальном времени над объектом управления без использования его модели (безмодельное экстремальное регулирование).

Для регулируемого электропривода лифта кабина лифта представляет собой объект управления с фиксированной нагрузкой в установившихся режимах. Нагрузка и режим работы электропривода (двигательный, генераторный) определяются загрузкой кабины и направлением её движения. Эти условия для электропривода сохраняются в течение всей поездки и могут быть определены до начала движения. Наиболее простая задача оптимизации энергопотребления регулируемым асинхронным электроприводом лифта – это минимизация потребляемого тока электродвигателем привода лифта в двигательном установившемся режиме работы за счет поддержания оптимального тока намагничивания в зависимости от заранее известной загрузки кабины лифта. Для этой цели используется модель мощности потерь, использующая выражение оптимального тока намагничивания как функцию от параметров и состояния двигателя. Практическое решение задачи оптимизации энергопотребления приводом лифта в этом случае заключается в переключении в алгоритме работы системы автоматического управления электроприводом от стандартного режима движения кабины лифта с формированием управляемого пуска и торможения к режиму, в котором при движении кабины лифта с постоянной скоростью обеспечивается, в зависимости от загрузки кабины, минимизация мощности потерь в двигателе.

Уравнения асинхронного двигате-

ля в осях x – y , ориентированных по токосцеплению ротора, имеют вид [4]:

$$U_{1x} = R_1 \cdot i_{1x} + L_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} - \omega_1 \cdot L_1 \cdot i_{1y};$$

$$U_{1y} = R_1 \cdot i_{1y} + L_1 \cdot \sigma \cdot \frac{di_{1y}}{dt} + \omega_1 \cdot (L_{1x} \cdot i_{1x} + \psi_{2x});$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot [L_{12} \cdot i_{1x} \cdot i_{1y} \cdot k_r],$$

где L_{1x} , L_1 , L_{12} – индуктивность рассеяния, индуктивность фазы статора, взаимная индуктивность соответственно; ω_1 – электрическая частота вращения; p_n – число пар полюсов; ψ_{2x} – потоко-сцепление ротора; R_1 – сопротивление статора; σ – коэффициент рассеяния; k_r – коэффициент магнитной связи ротора, $k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$.

Мощность переменных потерь, определяемая составляющими тока статора i_{1x} , i_{1y} двигателя в установившемся режиме работы [5]:

$$P = i_{1x}^2 R_1 + i_{1y}^2 (R_1 + R_2).$$

С учетом того, что в установившемся режиме работы двигатель создает момент, равный моменту нагрузки $M = M_n$, установившееся значение составляющей тока статора i_{1y} можно записать, как

$$i_{1y} = \frac{M_n}{3/2 p_n L_{12} i_{1x}}.$$

Соответственно, мощность переменных потерь асинхронного двигателя в установившемся режиме может быть

выражена, как

$$P = i_{1x}^2 R_1 + \left(\frac{M_n}{\frac{3}{2} p_n L_{12} i_{1x}} \right)^2 (R_1 + R_2).$$

Так как мощность потерь определяется составляющей тока i_{1x} , формирующей поток двигателя, то значение этого тока, при котором производная от мощности потерь $\frac{\partial P}{\partial i_{1x}}$ равна 0, будет являться минимальным значением, определяющим минимум потерь. Это оптимальное значение тока i_{1xonm} при постоянном значении L_{12} имеет вид [3]:

$$i_{1xonm} = \sqrt{\frac{M_n}{L_{12} p_n}} \sqrt{\frac{R_2 + R_1}{R_1}} = k_{onm} \sqrt{M_n}, \quad (1)$$

где $k_{onm} = \frac{1}{\sqrt{L_{12} p_n}} \sqrt{\frac{R_2 + R_1}{R_1}}$.

Оптимальное значение составляющей тока i_{1xonm} определяет и соответствующее оптимальное значение составляющей тока i_{1yonm} [3]:

$$i_{1yonm} = i_{1xonm} \sqrt{\frac{R_1}{R_2 + R_1}}.$$

Для используемого при моделировании двигателя (табл. 1) это соотношение

$$\frac{i_{1yonm}}{i_{1xonm}} = \sqrt{\frac{2,47}{2,47 + 1,87}} = 0,75.$$

Табл. 1. Параметры двигателя для моделирования

J , кг·м	R_1 , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L_{12} , Гн	L_1 , Гн	R_2 , Ом	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹	U_ϕ , В
4,5	2,47	336	11,87	4071	0,639	0,694	1,87	9,02	12,1	208

В рассматриваемой методике расчета оптимального значения составляющей тока $i_{1xном}$, как и в других подобных расчетах [3], индуктивность намагничивания принимается постоянной величиной, хотя она определяется нелинейной кривой намагничивания и при изменении тока намагничивания отличается от значения, соответствующего номинальному режиму работы. Для учета изменения индуктивности намагничивания при уточненной оценке мощности потерь в электроприводе может быть использована, например, линейная зависимость насыщения индуктивности от тока намагничивания [3].

Таким образом, алгоритм оптимального управления, минимизирующего потери в двигателе привода лифта в установившемся режиме при загрузке кабины, отличающейся от номинальной, может быть описан следующим образом. До начала движения кабины определяется загрузка кабины и в зависимости от выбранного направления движения кабины вверх или вниз – режим работы двигателя: двигательный или генераторный. При определении режима работы привода лифта как двигательного:

– по загрузке кабины вычисляется величина нагрузочного момента двигателя;

– вычисляется значение составляющей тока статора $i_{1xном}$, определяющее минимальное потокосцепление двигателя и минимизирующее переменные потери в двигателе;

– по завершении разгона кабины лифта (определяется по заранее заданному и достигаемому значению скорости кабины при завершении пуска) в структуре системы автоматического управления электроприводом происходит переключение от стандартного режима работы к оптимальному с минимизацией переменных потерь;

– при достижении кабиной лифта этажа назначения по команде датчика начала торможения (ДТ) происходит возврат к структуре системы автоматического управления, обеспечивающей стандартный режим работы привода лифта при торможении.

Блок-схема векторной системы автоматического управления (САУ) асинхронным двигателем в осях $y-x$, ориентированных по потокосцеплению ротора, работающей в соответствии с этим алгоритмом, показана на рис. 1.

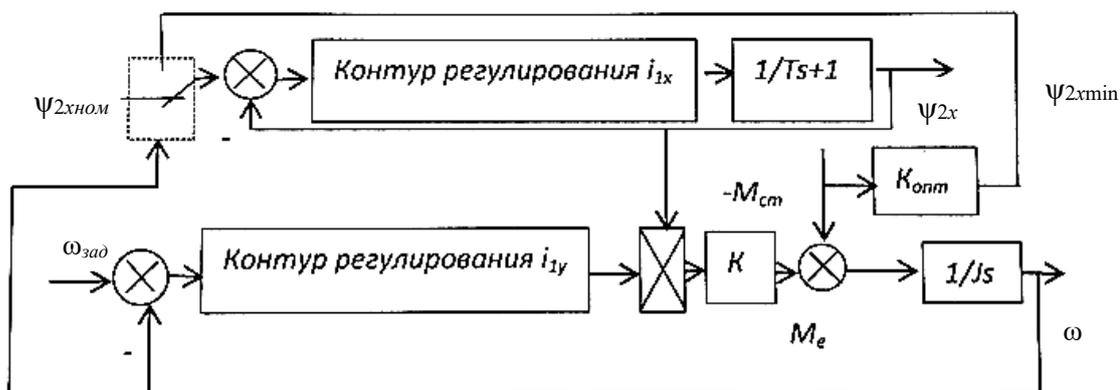


Рис. 1. Блок-схема оптимального электропривода

Модель САУ электроприводом лифта в осях $y-x$ в среде MATLAB, соответствующая блок-схеме (см. рис. 1), представлена на рис. 2. Параметры двигателя и механической подсистемы регулируемого асинхронного электропривода лифта, соответствующие безредукторному приводу пассажирского лифта грузоподъемностью (г/п) 630 кг и скоростью движения 1 м/с и используемые при моделировании, приведены в табл. 1.

В модели САУ электроприводом лифта блок задания скорости Signal Bilder1 формирует требуемую тахограмму движения привода. Время работы привода в установившемся режиме, в течение которого осуществляется оптимизация потерь, определяется блоками Step1, Step2 и логическими операторами Logica operator. На всех графиках (рис. 3–7) это промежуток времени с 3 до 6 с. В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточными функциями, указанными на рис. 2. Нагрузка формируется соответствующими блоками (выход блоков M_c) [6]. Два одинаковых блока формирования момента нагрузки позволяют отдельно задавать нагрузку в режиме работы привода без оптимизации переменных потерь и в режиме работы с оптимизацией (момент нагрузки 200 Н·м для случая работы привода в режиме оптимизации потерь). Цепь формирования сигнала задания потокосцепления двигателя ($\psi_{2x\min} = L_{12}i_{1x}$) в режиме минимизации составляющей тока i_{1x} образована блоками Sqr и Gain3 в соответствии с выражением (1). Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствии со схемой на рис. 2. Результаты моделирования работы электропривода показаны на рис. 3–7.

Осциллограммы изменения регулируемых параметров моделируемого электропривода показывают работоспособность электропривода с оптимизацией мощности переменных потерь в

установившемся режиме работы лифта при использовании предлагаемого алгоритма работы САУ с определением оптимальной составляющей i_{1x} в режимах работы двигателя при нагрузках, отличающихся от номинальной. Смоделирован установившийся режим работы при уменьшении нагрузки от номинальной до 200 Н·м. При этом потребляемый двигателем ток уменьшается с 15,4 до 10,8 А, или на 30 %. Соответственно, мощность переменных потерь в двигателе уменьшается с 560 до 350 Вт, или на 37,5 %, а отношение $\frac{i_{1y\text{ном}}}{i_{1x\text{ном}}} = \frac{6,7}{8,4} = 0,79$ при расчетном значении 0,75. Таким образом, разработана САУ регулируемым асинхронным электроприводом переменного тока лифта, оптимизирующая переменные потери в двигателе в установившемся двигательном режиме работы при загрузке кабины, отличающейся от номинальной.

Выводы

Предложен алгоритм работы и разработана САУ в регулируемом асинхронном электроприводе лифта с определением оптимальной составляющей тока статора i_{1x} в установившихся двигательных режимах работы двигателя при нагрузках, отличающихся от номинальной. Эта составляющая тока формирует потокосцепление двигателя, при котором переменные потери в двигателе минимальны. Смоделирован установившийся двигательный режим работы разработанного электропривода при уменьшении нагрузки от номинальной до 200 Н·м. При этом потребляемый двигателем ток уменьшается на 30 %, а мощность переменных потерь в двигателе – на 37,5 %. Реализация предложенного алгоритма работы в регулируемом асинхронном электроприводе лифта увеличивает энергоэффективность лифта в целом.

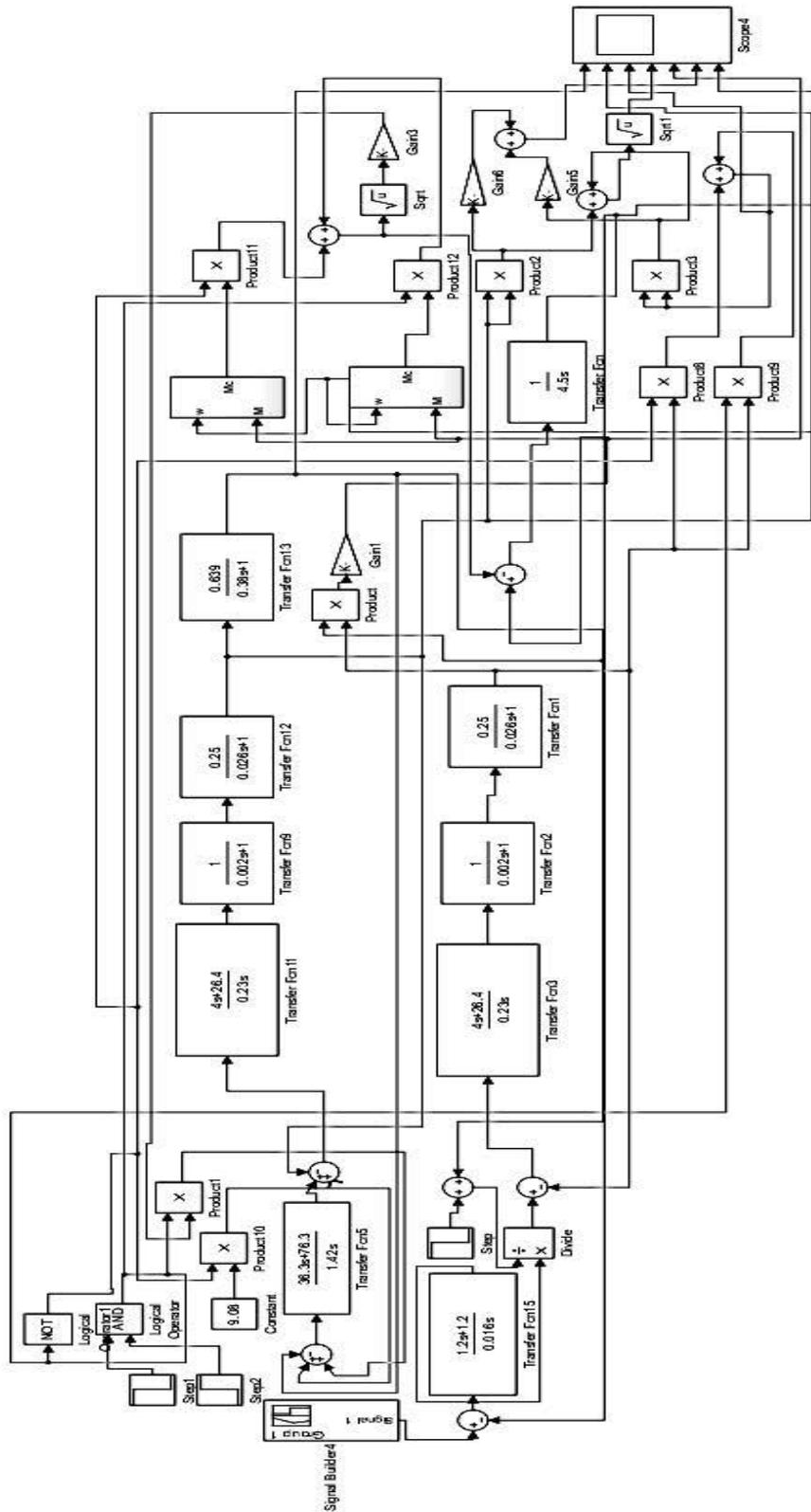


Рис. 2. Имитационная модель электропривода с минимизацией переменных потерь

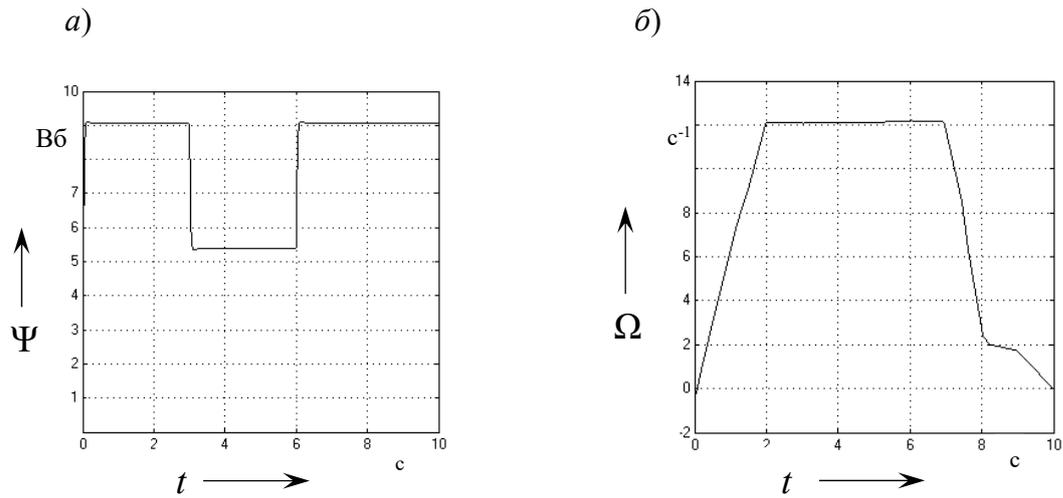


Рис. 3. Номинальное потокоцепление и потокоцепление в оптимальном режиме работы (а) и тахограмма задания скорости привода (б)

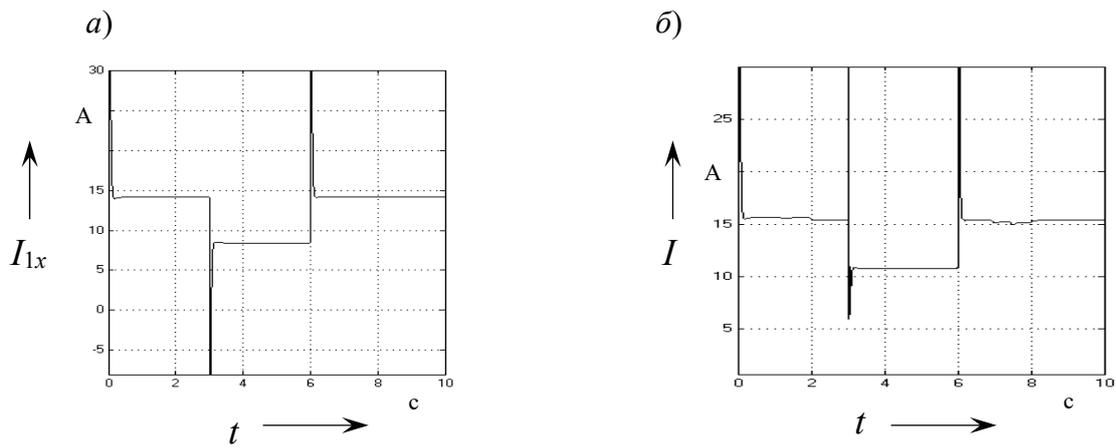


Рис. 4. Составляющая тока статора i_{1x} (а) и ток статора (б) при работе с номинальным потокоцеплением и в оптимальном режиме работы

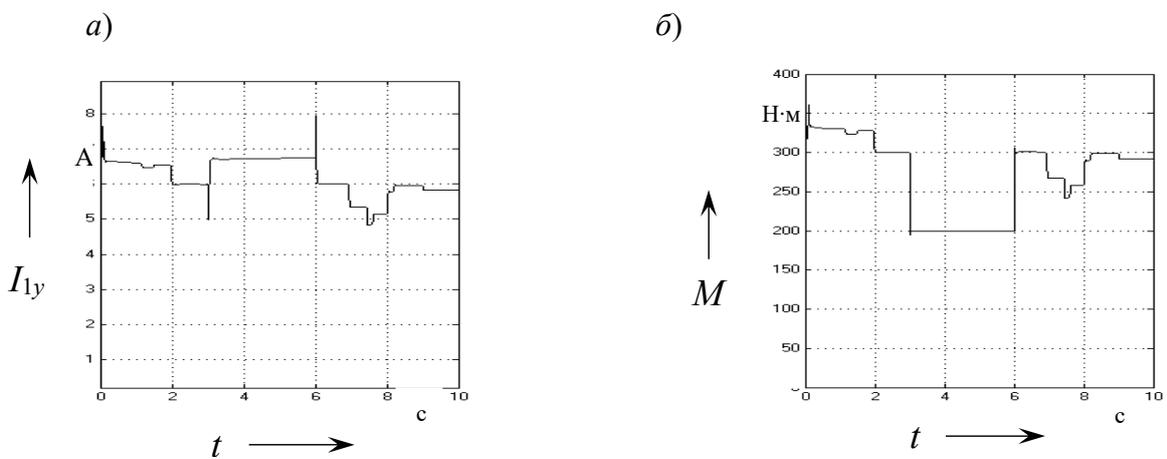


Рис. 5. Составляющая тока статора i_{1y} (а) и момент двигателя при работе с номинальным потокоцеплением ($M_{cm} = 300$ Н·м) и в оптимальном режиме работы ($M_{cm} = 200$ Н·м) (б)

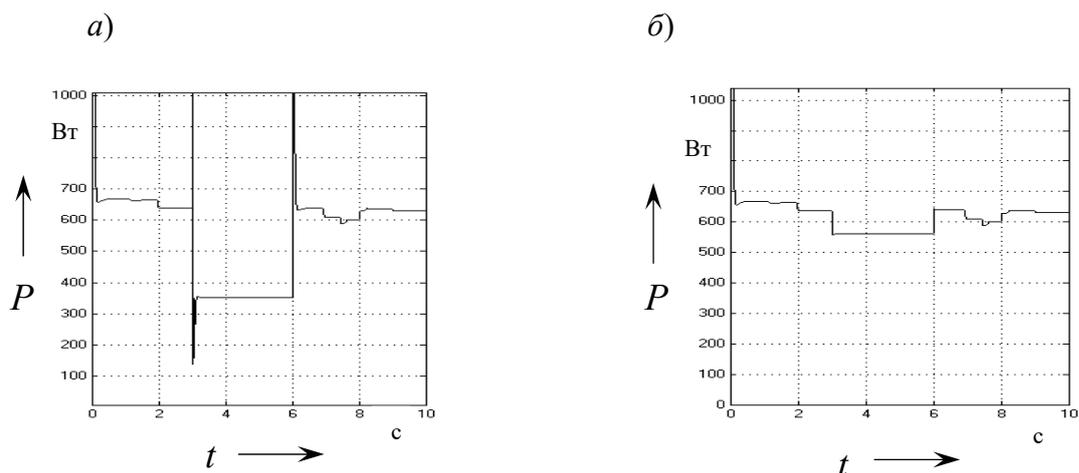


Рис. 6. Потери мощности при работе с режимом оптимизации (а) и с номинальным потокоцеплением (б)

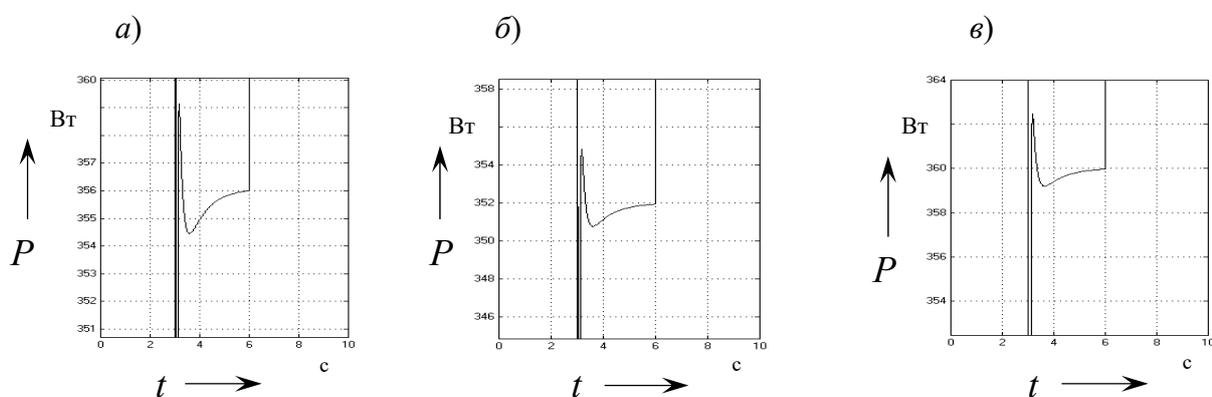


Рис. 7. Мощность потерь при работе в режиме минимизации тока: а – потокоцепление меньше оптимального (5 Вб); б – потокоцепление оптимальное (5,38 Вб); в – потокоцепление больше оптимального (6 Вб)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Браславский, И. Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – Москва: АКАДЕМИЯ, 2004. – 248 с.
2. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
3. **Борисевич, А. В.** Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями / А. В. Борисевич. – Москва: ИНФРА-М, 2017. – 102 с.
4. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
5. Синергетические методы управления сложными системами. Механические и электромеханические системы / А. А. Колесников [и др.]. – Москва: ЛИБРОКОМ, 2013. – 304 с.
6. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB / Р. Т. Шрейнер [и др.] // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, № 8 (19). – С. 27–33.

Статья сдана в редакцию 17 мая 2021 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergejevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.