

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ
РАБОЧЕГО ЦИКЛА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, А. В. Липов, К. А. Носков

**OPTIMIZATION OF PARAMETERS
OF WORK CYCLE DIAGRAM FREQUENCY-REGULATED
ASYNCHRONOUS MOTOR**

D. A. Tarasov, G. S. Bolshakov, A. V. Lipov, K. A. Noskov

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время широкое распространение в приводах различных машин и механизмов получили частотно-регулируемые асинхронные двигатели с управлением от программируемых контроллеров, которые позволяют гибко настраивать систему в соответствии с требуемыми параметрами движения. Выбор компонентов электропривода, как правило, осуществляется по требуемому усилию в режиме установившейся скорости. Однако существуют механизмы и устройства, в которых нагрузкой в установившихся режимах является только сила трения, которая несопоставимо мала по сравнению с инерционными нагрузками в переходных режимах. При этом характеристикой движения таких устройств является только время позиционирования, а скорость перемещения и ускорения при пуске и торможении, не являясь выходными характеристиками, оказывают существенное влияние на проектирование узлов устройства, так как определяют инерционные нагрузки и работу пар трения. *Материалы и методы.* Основаны на теории математического моделирования с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления функций одной и нескольких переменных, положениях теоретической механики и электропривода, а также методах математического программирования. *Результаты.* Предложен метод оптимизации параметров диаграммы рабочего цикла частотно-регулируемого асинхронного электропривода механизмов с преобладающей инерционной нагрузкой. *Выводы.* Разработанный метод оптимизации позволит по заданным массогабаритным характеристикам устройства и времени рабочего цикла подбирать элементы электропривода, такие как редуктор, электродвигатель и преобразователь частоты с минимальными мощностями.

Ключевые слова: оптимизация, циклограмма, электропривод, противотаранное устройство.

Abstract. *Background.* Currently, a wide distribution in the drives of various machines and mechanisms has received frequency-controlled asynchronous motors with control from programmable controllers, which allow flexible adjustment of the system in accordance with the required parameters of motion. The choice of the components of the electric drive, as a rule, is carried out according to the required force in the steady-state speed mode. However, there are mechanisms and devices in which the load in steady-state conditions is only the friction force, which is incommensurably small in comparison with the inertial loads in the transient regimes. In this case, only the time of positioning is the characteristic of the movement of such devices, and the speed of movement and acceleration during start-up and braking are not the output characteristics, have a significant influence on the design of the device nodes, since they determine the inertial loads and the work of friction pairs. *Materials and methods.* They are based on the theory of mathematical

modeling using the apparatus of differential and integral calculus of functions of one and several variables, the positions of theoretical mechanics and electric drive, as well as methods of mathematical programming. *Results.* A method for optimizing the parameters of a working cycle diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive of mechanisms with a predominant inertial load is proposed. *Conclusions.* The developed optimization method will allow to select the elements of the electric drive, such as a reducer, an electric motor and a frequency converter with minimum powers, according to the specified mass-size characteristics of the device and the operating time.

Key words: optimization, cyclogram, electric drive, antitouch device.

Введение

В настоящее время широко распространены механизмы, приводимые в движение автоматизированными электромеханическими системами. Одним из основных элементов таких систем является электродвигатель, который непосредственно преобразует электрическую энергию в механическую работу. С помощью соответствующих преобразовательных и управляющих устройств формируются требуемые динамические характеристики перемещения исполнительного органа технологического механизма.

Рассмотрим в качестве примера противотаранное управляемое устройство (барьер) с конструктивным исполнением в виде шлагбаума [1, 2, 3], представленное на рис. 1. Данное изделие предназначено для защиты охраняемых объектов путем создания физического препятствия несанкционированному въезду или выезду транспортных средств и принудительной их остановки.

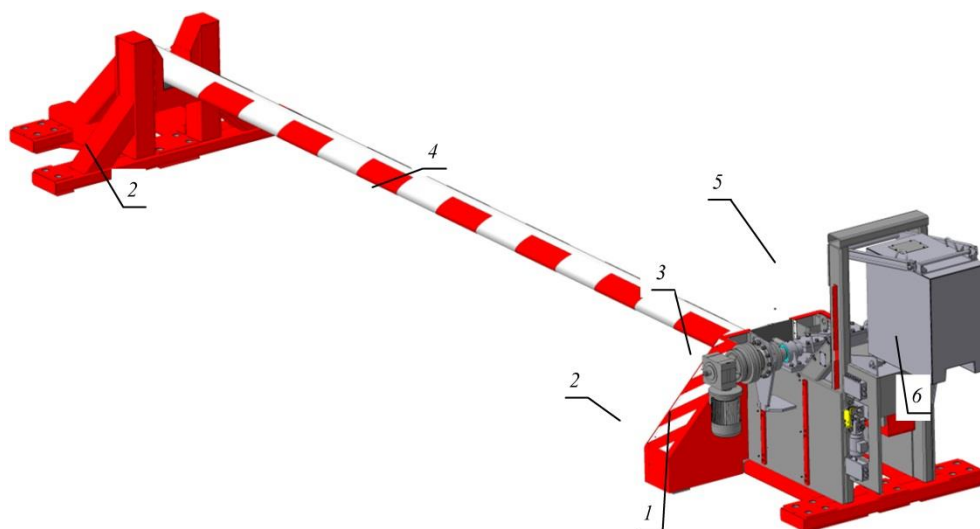


Рис. 1. Общий вид противотаранного управляемого устройства:
1 – электродвигатель; 2 – силовая опора; 3 – планетарный редуктор;
4 – стрела; 5 – рама; 6 – противовес

Принцип действия противотаранных устройств данного конструктивного исполнения заключен в быстром перекрытии проезжей части дорожного полотна перемещающейся стрелой барьера в вертикальной плоскости.

Согласно терминам и определениям, принятым в нормативной литературе [2], положение стрелы, зафиксированной на силовых опорах шлагбаума в горизонтальной плоскости, называется рабочим. В свою очередь, стрела, уравновешенная противовесом, на валу, установленном на раме барьера, перемещается из рабочего в нейтральное положение посредством мотора-редуктора. Нейтральным положением называется состояние противотаранного устройства, при котором стрела находится в крайнем верхнем положении и не препятствует продвижению транспортных средств через перекрываемый проезд.

Постановка задачи

Следуя терминам и определениям нормативного документа [4], типичное исполнительное устройство рассматриваемого изделия включает в себя электродвигатель, механический редуктор, преобразователь частоты и контроллер, предназначенные для приведения в движение и управления стрелой барьера.

Речь идет не только о сообщении стреле противотаранного устройства вращательного движения, но главным образом об обеспечении оптимального режима работы системы в целом, при котором за минимально возможное время стрела, перекрывающая проезд, перемещается из одного крайнего положения в другое. При этом оптимальной циклограммой работы будет та, у которой во время режима разгона достигается максимально допустимый крутящий момент, развиваемый мотором-редуктором. Это позволяет сократить время разгона и, соответственно, общее время работы электропривода, а значит, время перемещения стрелы барьера из нейтрального в рабочее положение, что является основным показателем готовности к работе противотаранного устройства в целом. В свою очередь, в режиме торможения мощность, выделяемая электродвигателем, работающим в генераторном режиме, не должна превышать той мощности, которую может рассеять преобразователь частоты за счет собственной конструкции, не используя дорогостоящее дополнительное оборудование в виде тормозного модуля и резистора. При этом время торможения так же, как и время разгона, должно быть минимальным.

Оптимизация параметров диаграммы рабочего цикла электропривода

Теперь детально рассмотрим электромеханическую систему переменного тока, использующую короткозамкнутый асинхронный двигатель с присоединенным планетарным редуктором, питающийся от преобразователя частоты.

Все преобразователи частоты имеют функции изменения характеристик разгона и торможения, обеспечивающих динамические параметры электродвигателя.

Характеристика разгона показывает темп, с которым происходит увеличение скорости вращения, и задается в виде времени разгона. В свою очередь характеристика торможения показывает, насколько быстро снижается скорость. Она задается в виде времени торможения. Эти параметры можно

изменять, тем самым увеличивая или уменьшая скорость в определенном интервале.

Длительность разгона можно установить такой малой величиной, что в некоторых случаях электродвигатель не сможет обеспечить разгон за заданное время.

Это приводит к увеличению тока электродвигателя до тех пор, пока не будет достигнут предел по току. Система контроля работы преобразователя частоты устроена таким образом, что при возникновении перегрузки по току преобразователь отключается.

В свою очередь, когда сигнал задания скорости снижается, электродвигатель переходит в режим частотного торможения. Замедление при торможении зависит от величины нагрузки электродвигателя.

Электродвигатель, работающий от преобразователя частоты, сохраняет энергию торможения в цепи постоянного тока последнего. Если мощность, выделяемая при торможении, велика и преобразователь частоты не может рассеять ее за счет собственной конструкции, напряжение цепи постоянного тока возрастает.

Напряжение цепи постоянного тока может расти до тех пор, пока преобразователь частоты не будет отключен средствами защиты.

Из всего этого следует, что очень важно сделать правильный выбор преобразователя частоты. От него будут зависеть эффективность и ресурс работы преобразователя и всего электропривода в целом. При выборе преобразователя частоты следует руководствоваться не только мощностью подключаемого электродвигателя, но и диапазоном рабочих скоростей двигателя, диапазоном рабочих моментов вращения, характером нагрузки и циклограммой работы механизма.

Исходными данными для построения диаграммы рабочего цикла служит режим эксплуатации механизма перемещения стрелы противотаранного устройства, его скорости и временные интервалы движения. На рис. 2 представлена такая диаграмма, на которой можно выделить три участка работы электропривода: разгон, рабочий ход, или установившееся движение, на котором скорость постоянна, и торможение.

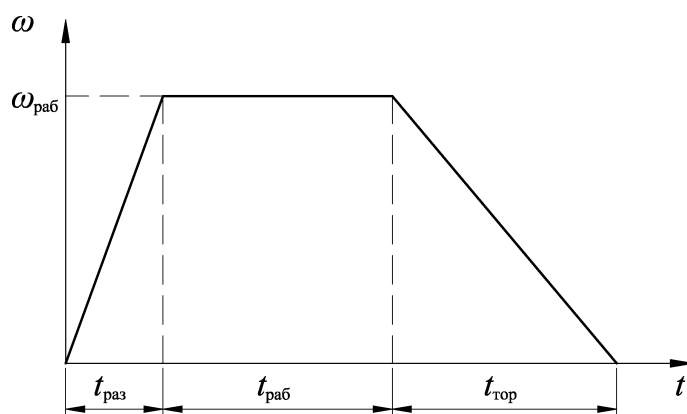


Рис. 2. Диаграмма рабочего цикла

Крутящий момент, требуемый для разгона, определяется из выражения

$$M_{\text{раз}} = \varepsilon_{\text{раз}} J, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{раз}}$ – угловое ускорение при разгоне, рад/с²; J – момент инерции нагрузки, кг·м².

В свою очередь, угловое ускорение при разгоне определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{раз}} = \frac{\omega_{\text{раб}}}{t_{\text{раз}}}, \quad (2)$$

где $\omega_{\text{раб}}$ – угловая скорость при рабочем ходе, рад/с; $t_{\text{раз}}$ – время разгона, с.

Подставив выражение (2) в формулу (1), выразим время разгона:

$$t_{\text{раз}} = \frac{\omega_{\text{раб}} J}{M_{\text{раз}}}. \quad (3)$$

Мощность, выделяемая при торможении, характеризуется максимальной (пиковой) мощностью, получаемой в начальный момент времени торможения, которая, в свою очередь, уменьшается до нуля пропорционально угловой скорости:

$$P_{\text{тор}} = M_{\text{тор}} \omega_{\text{раб}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{тор}}$ – момент силы торможения, Н·м.

Момент силы торможения определяется из выражения

$$M_{\text{тор}} = \varepsilon_{\text{тор}} J, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{тор}}$ – угловое замедление при торможении, рад/с².

В свою очередь, угловое замедление при торможении равно

$$\varepsilon_{\text{тор}} = \frac{\omega_{\text{раб}}}{t_{\text{тор}}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{тор}}$ – время торможения, с.

Подставив формулы (6) и (5) в выражение (4), выразим время торможения:

$$t_{\text{тор}} = \frac{\omega_{\text{раб}}^2 J}{P_{\text{тор}}}. \quad (7)$$

Из физического смысла задачи угол поворота стрелы барьера из одного крайнего положения в другое составляет $\pi/2$ рад и является суммой углов, пройденных при разгоне, рабочем ходе и торможении. Математически это записывается так:

$$\varphi_{\text{раз}} + \varphi_{\text{раб}} + \varphi_{\text{тор}} = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Угол поворота при разгоне равен

$$\varphi_{\text{раз}} = \frac{\varepsilon_{\text{раз}} t_{\text{раз}}^2}{2}. \quad (9)$$

Формула по нахождению угла поворота, пройденного с постоянной угловой скоростью, имеет вид

$$\varphi_{\text{раб}} = \omega_{\text{раб}} t_{\text{раб}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{раб}}$ – время рабочего хода, с.

Угол поворота при торможении

$$\varphi_{\text{тор}} = \frac{\varepsilon_{\text{тор}} t_{\text{тор}}^2}{2}. \quad (11)$$

Подставив уравнения (11), (10) и (9) в выражение (8) и зная, что $\varepsilon_{\text{тор}}$ определяется по формуле (6), а $\varepsilon_{\text{раз}}$ – по формуле (2), после сокращения получим:

$$\frac{\omega_{\text{раб}} t_{\text{раз}}}{2} + \omega_{\text{раб}} t_{\text{раб}} + \frac{\omega_{\text{раб}} t_{\text{тор}}}{2} = \frac{\pi}{2}. \quad (12)$$

Подставив в полученное выражение (12) ранее найденные по формуле (3) и (7) соответственно время разгона и торможения, запишем:

$$\frac{\omega_{\text{раб}}^2 J}{2M_{\text{раз}}} + \omega_{\text{раб}} t_{\text{раб}} + \frac{\omega_{\text{раб}}^3 J}{2P_{\text{тор}}} = \frac{\pi}{2}. \quad (13)$$

Из физического смысла задачи общее время работы состоит из времени разгона, рабочего хода и торможения и, в свою очередь, из постановки задачи должно быть минимальным:

$$t_{\text{раз}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{тор}} = t_{\text{общ}}. \quad (14)$$

Подставив выражения (3) и (7) в формулу (14), получим уравнение вида

$$\frac{\omega_{\text{раб}} J}{M_{\text{раз}}} + t_{\text{раб}} + \frac{\omega_{\text{раб}}^2 J}{P_{\text{тор}}} = t_{\text{общ}}. \quad (15)$$

Для решения задачи по построению оптимальной диаграммы рабочего цикла частотно-регулируемого асинхронного двигателя необходимо найти вектор значений аргументов, при которых целевая функция достигает минимума. В качестве целевой функции будем использовать общее время работы электропривода. Угловая скорость и время ее действия на участке установившегося движения являются аргументами, по которым производится минимизация.

Таким образом, целевая функция примет вид

$$f(\omega_{\text{раб}}, t_{\text{раб}}) = \frac{\omega_{\text{раб}} J}{M_{\text{раз}}} + t_{\text{раб}} + \frac{\omega_{\text{раб}}^2 J}{P_{\text{тор}}}. \quad (16)$$

При этом задача оптимизации содержит ограничение. Это ограничение задается некоторой функцией и следует из равенства девяноста градусам угла, пройденного из одного крайнего положения в другое стрелой барьера, приводимой в движение электроприводом:

$$g(\omega_{\text{раб}}, t_{\text{раб}}) = \frac{\omega_{\text{раб}}^2 J}{2M_{\text{раз}}} + \omega_{\text{раб}} t_{\text{раб}} + \frac{\omega_{\text{раб}}^3 J}{2P_{\text{тор}}} - \frac{\pi}{2} = 0. \quad (17)$$

Решение рассматриваемой задачи условной минимизации можно получить, используя аналитический метод – метод множителей Лагранжа [5, 6].

После того как определена установившаяся угловая скорость вращения стрелы барьера, измеряемая в радианах, появляется возможность по следующей формуле перейти к частоте вращения ротора электродвигателя, измеряемой в оборотах в минуту:

$$n_{\text{раб}} = \frac{60}{2\pi} \omega_{\text{раб}} i, \quad (18)$$

где i – передаточное число редуктора.

Частота напряжения, питающего обмотки статора электродвигателя, связана с частотой вращения его ротора зависимостью

$$f_{\text{раб}} = \frac{n_{\text{раб}} p}{60}, \quad (19)$$

где p – число пар полюсов статора электродвигателя.

Таким образом, частота вращения ротора электродвигателя зависит от частоты напряжения питания. На этой зависимости и основан метод частотного регулирования. Изменяя с помощью преобразователя частоту на входе электродвигателя, можно регулировать частоту вращения ротора.

Для построения нагрузочных диаграмм, характеризующих работу электропривода и представляющих собой зависимости угловой скорости, вращающего момента, мощности и угла поворота от времени, необходимо иметь аналитическое выражение диаграммы рабочего цикла, для этого выполним линейную аппроксимацию данного графика.

В качестве примера с диаграммы рабочего цикла, представленной на рис. 2, в координатах «частота напряжения питания на входе электродвигателя – время» снимем значения абсцисс и ординат нескольких характерных точек: начала и конца площадки установившегося движения, точек, соответствующих общему времени работы и началу координат.

Вектор частоты питающего напряжения электродвигателя запишем следующим образом:

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_{\text{раб}} \\ f_{\text{раб}} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Вектор значений, расположенных на оси абсцисс, примет вид

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ t_{\text{раз}} \\ t_{\text{раз}} + t_{\text{раб}} \\ t_{\text{раз}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{тор}} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

После получения уравнения кривой частоты питающего напряжения электродвигателя от времени можно построить тахограмму движения стрелы барьера по выражению

$$\omega(t) = \frac{2\pi f(t)}{pi}. \quad (22)$$

Формулу для определения угла поворота стрелы барьера в любой момент времени получим путем интегрирования выражения (22):

$$\varphi(t) = \frac{180}{\pi} \int_0^t \omega(t) dt. \quad (23)$$

В уравнении (23) за знак интеграла вынесен коэффициент перевода в градусы величины угла, измеряемой в радианах.

Момент определяется величиной инерционной массы, приводимой в движение. Противотаранное управляемое устройство с конструктивным исполнением в виде шлагбаума рассматривается как одностепенная динамическая система с приведением момента инерции вращающейся стрелы барьера, уравновешенной противовесом, к валу мотора-редуктора.

Момент, обусловленный изменением кинетической энергии за счет изменения угловой скорости, определяется по формуле

$$M(t) = J \frac{d}{dt} \omega(t). \quad (24)$$

Зависимость мощности от момента основана на выражении

$$P(t) = M(t) \omega(t). \quad (25)$$

Проверка адекватности предложенного метода оптимизации

В качестве оценки адекватности разработанного метода оптимизации параметров циклограммы частотно-регулируемого электропривода проведем сравнительный анализ диаграмм, представляющих собой зависимость частоты питающего напряжения электродвигателя от времени. Данные диаграммы получим с помощью вычислительного и натурного экспериментов. Для этого рассмотрим противотаранное управляемое устройство, представленное на рис. 1.

Указанное изделие содержит планетарный мотор-редуктор с передаточным отношением $i = 260,4$, крутящим моментом $M = 4000$ Н·м и электродвигателем с двумя парами полюсов $p = 2$, а также преобразователь частоты, способный

рассеять за счет собственной конструкции мощность, выделяемую электродвигателем в генераторном режиме, равную $P = 1000$ Вт. Момент инерции нагрузки, приведенный к ротору электродвигателя, равен $J = 16\,000$ кг·м². Время перемещения стрелы устройства из одного крайнего положения в другое не должно превышать 7 с.

В результате вычислительного эксперимента, проведенного с помощью математического пакета *MathCad*, реализующего предложенный метод оптимизации, получена зависимость частоты напряжения, питающего обмотки статора электродвигателя от времени. Из рис. 3 видно, что значение частоты на участке установившегося движения составило $f_{\text{раб}} = 22$ Гц.

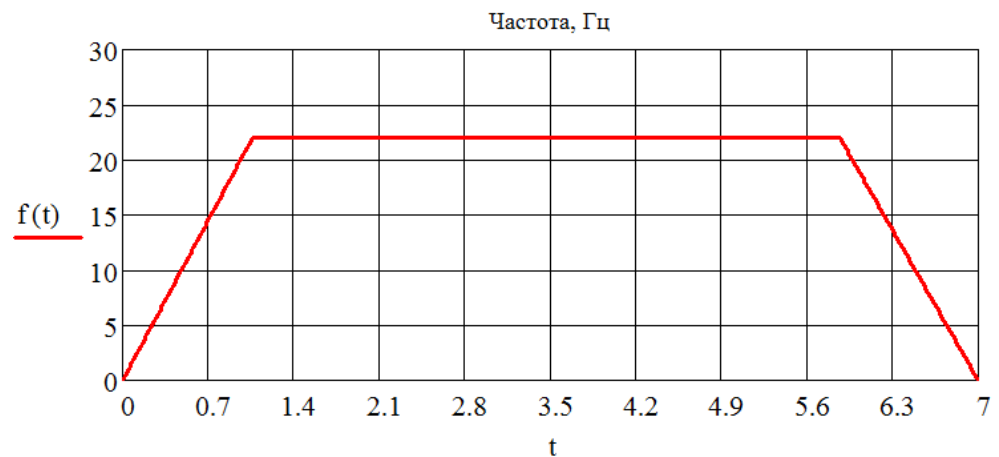


Рис. 3. Диаграмма рабочего цикла

В ходе натурального эксперимента с помощью цифрового осциллографа АКТАКОМ ADS-2102 с многофункционального аналогового выхода преобразователя частоты в режиме реального масштаба времени получена диаграмма выходной частоты питающего напряжения электродвигателя.

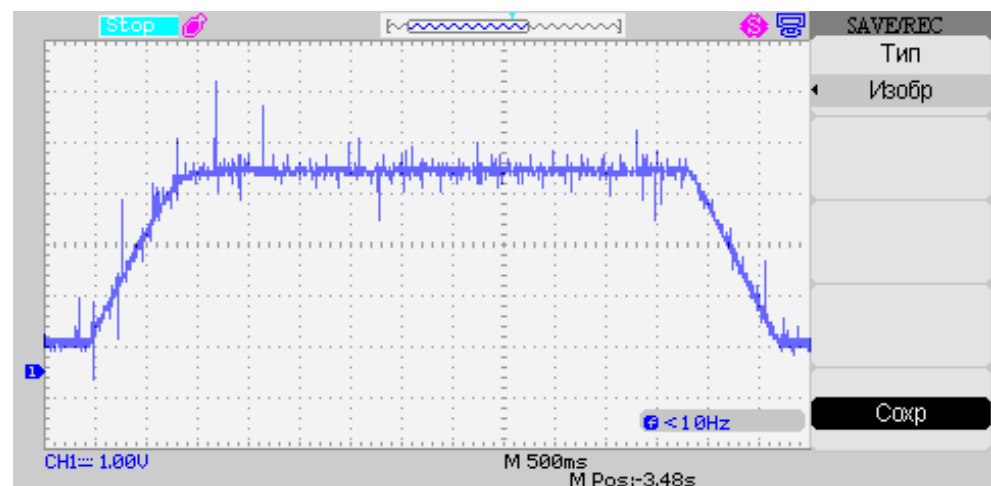


Рис. 4. Диаграмма рабочего цикла

Многофункциональный аналоговый выход выводит постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 7,5 В. Значение напряжения в 7,5 В соответствует номинальной частоте в 50 Гц.

Из рис. 4 видно, что значение частоты на рабочей скорости, полученное в ходе натурального эксперимента, составило порядка $f_{\text{раб}} = 23$ Гц. При этом время работы зафиксировано в районе 6,8 с. Расхождение значений параметров, характеризующих диаграмму рабочего цикла в координатах «частота питающего напряжения – время», составляет менее 5 %, что подтверждает адекватность разработанного метода оптимизации.

Заключение

Анализируя получаемые нагрузочные диаграммы, можно сделать вывод о правильности предварительного выбора электродвигателя, передаточного механизма и преобразователя частоты.

Максимально допустимый момент, развиваемый мотором-редуктором, должен быть больше или равен максимальному моменту, определенному по нагрузочной диаграмме механизма перемещения стрелы противотаранного устройства.

В процессе перемещения стрелы барьера из одного крайнего положения в другое электродвигатель имеет участок работы в тормозном режиме. Для обеспечения такого режима работы необходимо выполнить следующее условие: рассеиваемая в режиме рекуперации мощность должна быть меньше указанной в параметрах преобразователя частоты номинальной мощности и соответствующего времени ее действия.

Предложенный метод параметрической оптимизации циклограммы работы частотно-регулируемого асинхронного двигателя может получить дальнейшее развитие в виде численных алгоритмов с последующей реализацией в форме комплекса проблемно-ориентированных программ [7, 8].

Данный комплекс программ позволит по заданным массогабаритным характеристикам противотаранного устройства, выполненного в виде шлагбаума, и временному интервалу приведения его в рабочее положение подбирать элементы электропривода, такие как редуктор, электродвигатель и преобразователь частоты с минимальными мощностями, а следовательно, и стоимостью.

Вместе с тем рассматриваемый комплекс программ сможет решать и обратную задачу, в частности, по характеристикам имеющегося электропривода позволит определять максимальное быстродействие электромеханической системы перемещения стрелы барьера, а также настраиваемые параметры преобразователя частоты, обеспечивающие такое быстродействие. При этом может накладываться ограничение по мощности, рассеиваемой преобразователем частоты без использования тормозного резистора, что также снижает стоимость электропривода в целом.

Кроме того, комплекс программ может найти применение в виде виртуальных лабораторий для проведения подготовки инженерного персонала по

настройке противотаранных управляемых устройств с конструктивным исполнением в виде шлагбаума, а именно, обеспечение требуемых динамических характеристик перемещения стрелы барьера путем ввода настраиваемых параметров преобразователя частоты.

Еще одно возможное применение заключается в создании на базе комплекса программ системы мониторинга и контроля технического состояния противотаранных управляемых устройств. Принцип работы такой системы основан на сравнении истинных нагрузочных диаграмм, получаемых в режиме реального масштаба времени с преобразователя частоты, с нагрузочными диаграммами, построенными в результате работы программного комплекса. Значительное расхождение в пиковых значениях контролируемых параметров может свидетельствовать о наличии механических неисправностей.

Библиографический список

1. Тарасов, Д. А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных поездов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1 (18). – С. 111–117.
2. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния стальных канатов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (73). – С. 215–221.
3. Коновалов, В. В. Компьютерное моделирование определения реакций опор гибких барьеров / В. В. Коновалов, Д. А. Тарасов, В. Ю. Зайцев, Н. В. Байкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 3. – С. 72–79.
4. ГОСТ Р 57362-2016. Устройства противотаранные управляемые. Классификация. Термины и определения; введ. 16.12.16. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2017. – 7 с.
5. Тарасов, Д. А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 56–62.
6. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование оптимизации параметров несущих элементов, выполненных из стальных канатов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Интеграл. – 2012. – № 6. – С. 118–120.
7. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования напряженно-деформированного состояния стальных канатов / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12 (16). – С. 114–120.
8. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования работы стальных канатов при действии поперечной динамической нагрузки / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 48–55.

Тарасов Денис Александрович

кандидат технических наук,
начальник отдела инженерного анализа
конструкций и защиты
интеллектуальной собственности,
ЗАО «ЦеСИС НИКИРЭТ»
E-mail: den517375@ya.ru

Tarasov Denis Alexandrovich

candidate of technical sciences,
head of engineering analysis of structures
and protection of intellectual property,
Closed Joint-stock company
«Center of special engineering
constructions of research and design
Institute of radio electronic technology»

Большаков Герман Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерного проектирования
технологического оборудования,
Пензенский государственный
университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Bolshakov German Sergeyevich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of computer aided design
of technological equipment,
Penza State University

Липов Александр Викторович

кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой компьютерного
проектирования технологического
оборудования,
Пензенский государственный
университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Lipov Alexander Viktorovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
head of sub-department of computer aided
design of technological equipment,
Penza State University

Носков Кирилл Андреевич

магистр,
инженер-конструктор отдела
приводной и специальной техники,
ЗАО «ЦеСИС НИКИРЭТ»
E-mail: kb@cesis.ru

Noskov Kirill Andreyevich

master, engineer-designer,
department of driving
and special equipment,
Closed Joint-stock company
«Center of special engineering
constructions of research and design
Institute of radio electronic technology»

УДК 621.3

Тарасов, Д. А.

Оптимизация параметров диаграммы рабочего цикла частотно-регулируемого асинхронного двигателя / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, А. В. Липов, К. А. Носков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 4 (24). – С. 176–187.