

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Г. И. Однокопылов, А. Д. Брагин

*Рассмотрен принцип построения многофазного асинхронного электропривода, позволяющего при неоднократных отказах преобразователя частоты и двигателя обеспечить отказоустойчивое управление на основе программируемых несинусоидальных токов с восстановлением работоспособности за счет активизации алгоритма восстановления в управляющем микроконтроллере. Приведены результаты моделирования для аварийной ситуации типа: «обрыв фазы» для случая трехфазного двигателя с полным восстановлением работоспособности асинхронного двигателя.*

*Ключевые слова: живучесть асинхронного электропривода, многофазный асинхронный электропривод, несинусоидальный ток.*

Для электроприводов в составе опасных производственных объектов (ядерных, военных, химических, строительных, металлургических, транспортных, в том числе трубопроводного транспорта) целесообразно применение отказоустойчивого управления с обеспечением свойства «живучести». Аварийный выход из строя таких электроприводов может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования с риском для персонала, большими экономическими потерями.

Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 "О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации" от 28.03.2001 г.

По ГОСТ 27.002–89 свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов определяется термином «живучесть». Для вышеперечисленных областей применения асинхронного двигателя (АД) задача обеспечения отказоустойчивости с обеспечением свойства живучести становится определяющей.

Из теории живучести технических систем известно, что данным свойством обладают только избыточные системы, а избыточность в технических системах достигается через резервирование. Можно выделить пять видов резервирования (рисунок 1) для обеспечения отказоустойчивости электроприводов.

Известные устройства и способы обеспечения живучести электропривода переменного тока на основе АД рассмотрены в работе [1]. По способу обеспечения необходимой избыточности силовых цепей электропривода воз-

можны два подхода: со структурной избыточностью и с функциональной избыточностью.



Рисунок 1 – Связь видов резервирования в обеспечении отказоустойчивости электроприводов

Электропривод на основе структурного резерва не получил широкого распространения ввиду сложности и высокой стоимости.

Развитие и применение получили системы электропривода на основе функционального резервирования с наличием избыточности силовых цепей в неявной форме.

Избыточность системы электропривода на основе информационного (процессорного) резерва имеет тенденцию к удвоению вычислительной мощности каждые 18 месяцев при неизменной стоимости, согласно закону Гордона Мура (Intel, USA), что позволяет обеспечивать выполнение усложненных алгоритмов восстановления работоспособности электропривода.

Нагрузочный резерв позволяет обеспечить необходимый запас по току и напряжению силовых элементов электропривода в процессе восстановления работоспособности и последующего функционирования.

Временной резерв в алгоритме восстановления позволяет использовать фильтрующие свойства запасенной энергии маховых масс электропривода для снижения про-

вала частоты вращения в процессе переключения структуры электропривода.

На рисунке 2 приведены способы обеспечения отказоустойчивости частотно-регулируемых АД с функциональным резервированием и алгоритмическим восстановлением работоспособности.

руемых АД с функциональным резервированием и алгоритмическим восстановлением работоспособности.

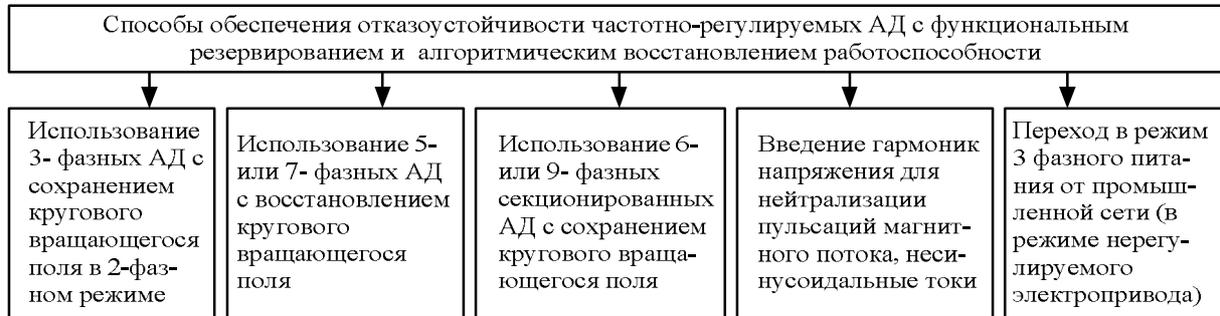


Рисунок 2 – Способы обеспечения отказоустойчивости частотно-регулируемых АД с функциональным резервированием и алгоритмическим восстановлением работоспособности

В работе [2] показано, что использование 5- или 7-фазных АД в электроприводе с векторным управлением имеет преимущество, так как при большом числе фаз обеспечивается дополнительная степень свободы. Требуемая комбинация токов для обеспечения той же вращающейся МДС после обрыва фазы становится не уникальной (т. е. возможно несколько вариантов). При обрыве одной фазы и соответствующем управлении не будет обязательным наличие нулевой последовательности токов в отличие от трехфазного АД. Поэтому можно исключить провод соединения с нейтралью и обеспечить работу АД с гладким, без пульсаций моментом алгоритмическим путем в программе микроконтроллера на основе функционального резервирования.

В работе [3] показано, что при использовании 9-фазных АД, выполненных в виде 3 секций возможна работа при обрыве 2 фаз с сохранением работоспособности и при обрыве 1 фазы с сохранением номинального момента и с увеличением плотности тока в оставшихся фазах рабочих секций. При отказе в одной из фаз 6-фазного АД возможна работа с одной 3-фазной обмоткой в половину мощности. Многофазный электропривод содержит по определению элементы избыточности в неявной форме, поэтому в нем может быть обеспечено восстановление на основе функционального резервирования с алгоритмическим изменением структуры электропривода при выявлении отказа в одной из фаз. Применение функционального резервирования позволяет без дополнительных аппаратных затрат за счет внутренней избыточности и избыточности информацион-

ного или процессорного ресурса обеспечить восстановление работоспособности.

В статье рассматривается способ обеспечения повышенной живучести многофазного АД за счет изменения формы токов в оставшихся фазах и с полным исчерпанием избыточного резерва. Обеспечивается частичное восстановление работоспособности с номинальным моментом на основе несинусоидальных токов для электродвигателя со связанными и развязанными [4] фазами при внезапных отказах преобразователя частоты типа «невключение ключа», «невывключение ключа» или обрыв фазы двигателя.

Функциональная схема преобразователя частоты с  $m$ -фазным АД приведена на рисунке 3, где ИН – источник напряжения, ПЧ<sub>1</sub>...ПЧ <sub>$m$</sub>  – ключевые усилители преобразователя частоты, нагрузкой которых служат обмотки фаз «1»...« $m$ »  $m$ -фазного АД.

Выражения для синусоидальных фазных токов  $I_i$ :  $I_{N1} \dots I_{Nm}$ ,  $i=1 \dots m$  могут быть записаны в виде:

$$I_{N1} = I_{M1} \cdot \sin \omega t ;$$

$$I_{Nm} = I_{Mm} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m}\right),$$

где  $I_{M1} = I_{Mm} = I_M$ ,  $I_M$  – амплитуда фазного тока.

В первом приближении процесс модуляции по току ключевых усилителей ПЧ<sub>1</sub>...ПЧ <sub>$m$</sub>  с синусоидальной огибающей для основной гармоники можно представить через непрерывные модулирующие функции  $\hat{E}_1(t) \dots \hat{E}_m(t)$  (математический аппарат коммутационных разрывных функций) [5], ус-

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

танавливающие связь между энергетическим входом и выходом ключевых усилителей мощности ПЧ<sub>1</sub>...ПЧ<sub>м</sub>:

$$I_1 = I_{N1} \cdot K_1(t) = I_M \cdot \sin^2 \omega t ;$$

$$I_m = I_{Nm} \cdot K_m(t) =$$

$$= I_M \cdot \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right),$$

где  $K_1(t) = \sin \omega t$  ;

$$K_m(t) = \sin \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right).$$

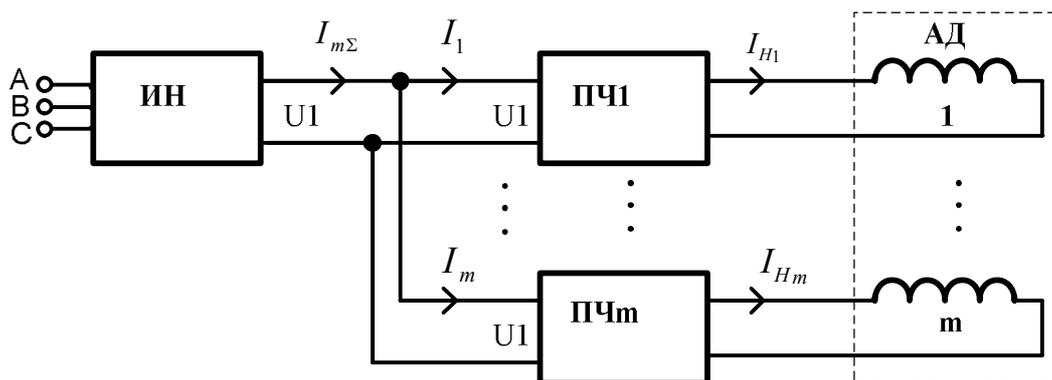


Рисунок 3 – Функциональная схема *m*-фазного преобразователя частоты

Поэтому:

$$I_{m\Sigma} = I_M (\sin^2 \omega t + \dots +$$

$$+ \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right)) =$$

$$= I_M \sum_{i=1}^m \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right) = \frac{I_M m}{2},$$

учитывая, что согласно теореме о сумме квадратов синусов (косинусов):

$$\sum_{i=1}^m \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right) = \frac{m}{2}.$$

Активную мощность полностью работоспособного *m*-фазного АД, потребляемую от источника напряжения ИН (рисунок 3) можно представить в виде:

$$P_m = \eta U_1 I_{m\Sigma},$$

где  $\eta$  – КПД преобразователя частоты,  $U_1$  – постоянное напряжение на выходе ИН.

Поэтому для *m*-фазного АД с синусоидальными токами в обмотках статора можно записать:

$$P_m = \eta U_1 I_M m / 2.$$

В случае выявления *n* отказов для *m*-фазного АД (предполагается последовательная обработка отказов во времени, хотя алгоритм предполагает и одновременные

множественные отказы) и формирования соответствующих битов отказов  $a_i$  ( $a_i=1, \bar{a}_i=0$  – есть отказ соответствующей фазы преобразователя частоты, отказ ключа преобразователя частоты или обрыв обмотки статора; значение 0 бита отказа означает нулевой  $I_i$  ток в соответствующей фазе) потребляемый ток  $I_{n\Sigma}$  от источника напряжения ИН может быть записан в виде:

$$I_{n\Sigma} = \bar{a}_1 I_1 + \dots + \bar{a}_m I_m.$$

$$I_{n\Sigma} = I_M (\bar{a}_1 \sin^2 \omega t + \dots +$$

$$+ \bar{a}_m \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right)) =$$

$$= I_M \sum_{i=1}^m \bar{a}_i \sin^2 \left( \omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right).$$

Активную потребляемую мощность от источника напряжения ИН (рисунок 3) с учетом наличия *n* выявленных битов отказов  $\bar{a}_i$ , можно записать в виде:

$$P_n = \eta U_1 I_{n\Sigma}.$$

Восстановление работоспособности возможно при выполнении условия равенства активной мощности  $P_m$  до и  $P_n$  после появления *n* отказов в случае соответствующего уве-

личения токов в оставшихся фазах в  $k$  раз:  $k = P_m/P_n$  для выполнения условия:  $P_m = k P_n$ .

Кроме того, необходимо выполнение условия анализа остаточного резерва электропривода, вычисляемого как  $m-n$ . Если  $m-n \geq 2$ , возможно восстановление работоспособности электропривода с формированием несинусоидальных токов в обмотках статора:

$$k = \frac{P_n}{P_m} = \frac{I_{n\Sigma}}{I_{m\Sigma}} = \frac{\frac{m}{2}}{\sum_{i=1}^m \bar{a}_i \sin^2\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m}\right)} \quad (1)$$

Фазные токи в системе управления электроприводом формируются по выражению:

$$I_i = \frac{I_M \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m}\right) \frac{m}{2}}{\sum_{i=1}^m \bar{a}_i \sin^2\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{m}\right)}$$

Обязательным требованием реализации алгоритма восстановления является наличие программного управления формируемыми фазными токами. На основе анализа фазных токов осуществляется выявление битов отказов в каждом такте ШИМ. В рабочем режиме работы происходит программное формирование синусоидальных фазных токов, а после выявления отказа форма тока становится несинусоидальной, причем форма тока в каждой фазе зависит от числа фаз двигателя и числа отказов.

Для проверки предложенного способа повышения живучести АД была разработана имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода в среде Matlab Simulink [6] для двигателя типа МТФ-311-6.

На рисунках 4, 5 приведены результаты моделирования для АД при  $m=3$ ,  $n=2$  и отказе в фазе «А»:  $\bar{a}_a = 0$ ,  $I_a = I_M \bar{a}_a \sin \omega t = 0$  для случая 0,6 номинальной нагрузки двигателя, на рисунке 4 – с синусоидальными токами в двух оставшихся фазах, на рисунке 5 – с несинусоидальными токами в двух оставшихся фазах.

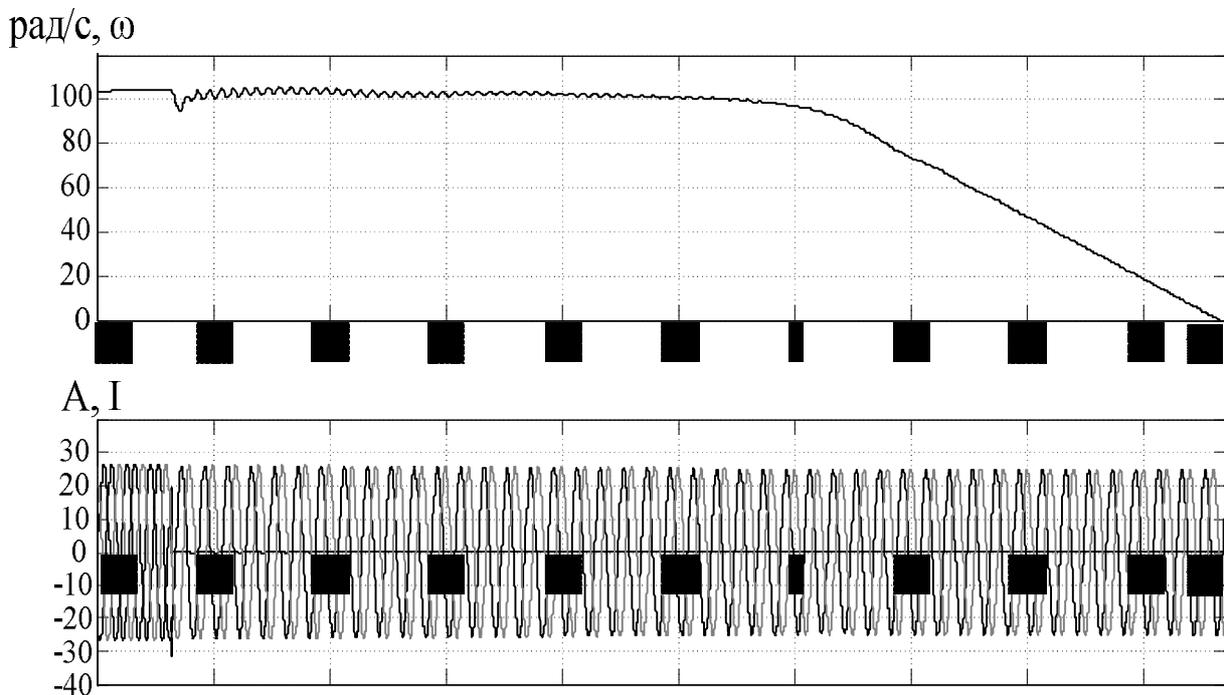
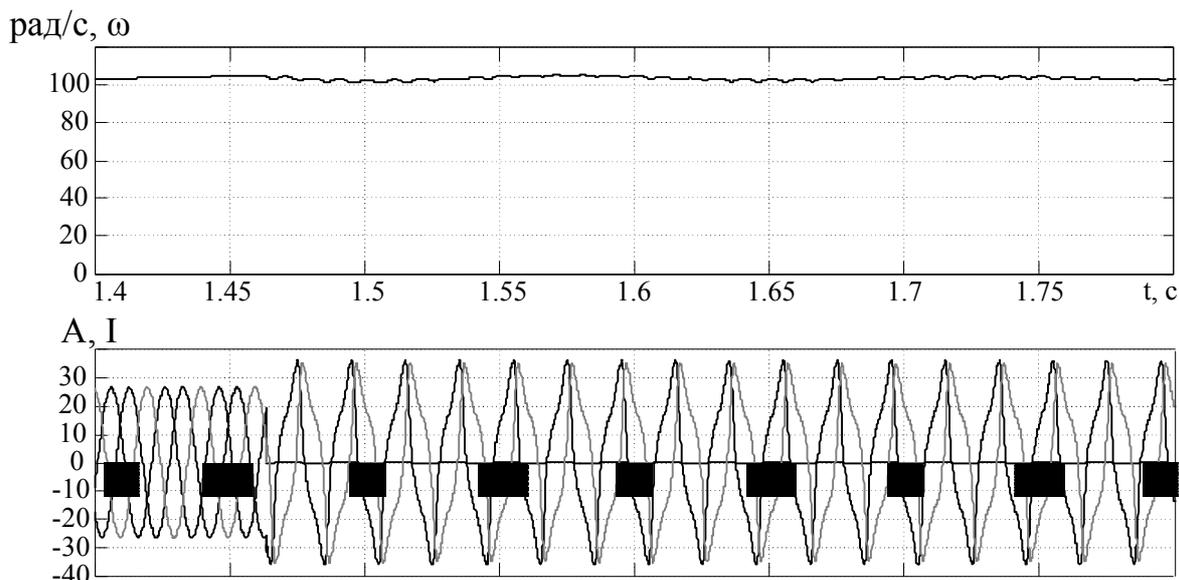


Рисунок 4 – Временные диаграммы переходных процессов переключения структуры электропривода из рабочего трехфазного при аварии в одной из фаз в аварийный двухфазный режим работы с синусоидальными фазными токами

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД



*Рисунок 5 – Временные диаграммы переходных процессов переключения структуры электропривода из рабочего трехфазного при аварии в одной из фаз в аварийный двухфазный режим работы с несинусоидальными фазными токами*

Выражение (1) для коэффициента  $k$  в этом случае упрощается:

$$k = \frac{P_2}{P_3} = \frac{I_{2\Sigma}}{I_{3\Sigma}} = \frac{\frac{3}{2}}{(\bar{a}_b \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \bar{a}_c \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}))}$$

Несинусоидальные фазные токи в системе управления электроприводом формируются по выражениям:

$$I_b = \frac{\frac{3}{2} I_M \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})}{(\bar{a}_b \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \bar{a}_c \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}))};$$

$$I_c = \frac{\frac{3}{2} I_M \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})}{(\bar{a}_b \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \bar{a}_c \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}))}.$$

Из временных диаграмм видно, что для электропривода с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты при отказе в одной из фаз в режиме 0,6 номинального момента не удастся восстановить работоспособность по частоте вращения в случае формирования синусоидальных токов (рисунок 4), в случае формирования несинусоидальных токов работоспособность

двигателя удастся полностью восстановить (рисунок 5). При этом амплитуда несинусоидальных фазных токов возрастает как в переходных процессах, так и в установившемся режиме в 1,33 раза. Как видно из временных диаграмм за счет заданного алгоритмом программного формирования формы тока в фазных обмотках происходит сдвиг векторов токов в оставшихся фазах до величины  $\pi/3$  радиан и, с учетом равенства МДС в фазах, выполняется условие сохранения кругового вращающегося поля двигателя.

Алгоритм отказоустойчивого управления с повышением живучести многофазного АД с синусоидальными токами при неоднократном аварийном отключении фаз двигателя в процессе формирования несинусоидальных токов на основе функционального резервирования отличается сравнительной простотой, при этом основная нагрузка ложится на информационный (процессорный) резерв и нагрузочный резерв.

### ВЫВОДЫ

1. Разработаны принцип и способ отказоустойчивого управления с повышением живучести многофазного асинхронного двигателя с синусоидальными фазными токами в рабочем режиме, позволяющие при неоднократном аварийном отключении фаз двигателя на основе изменения формы токов в оставшихся фазах на несинусоидальные с контролем степени истощения избыточного резерва, вплоть до полного истощения, при

ОДНОКОПЫЛОВ Г. И., БРАГИН А. Д.

наличии двух исправных фаз двигателя.

2. На основе разработанной в среде Matlab Simulink имитационной модели показан процесс восстановления работоспособности трехфазного асинхронного электропривода с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты при отказе в одной из фаз на основе формирования несинусоидальных фазных токов, позволяющий полностью восстановить работоспособность двигателя в режиме 0,6 номинального момента. В процессе формирования способа отказоустойчивого управления амплитуда несинусоидальных фазных токов возрастает в переходных процессах и в установившемся режиме в 1,33 раза и происходит компенсация мощности вышедшей из работы фазы.

3. В процессе формирования способа отказоустойчивого управления за счет заданного алгоритмом программного искажения формы тока в фазных обмотках происходит сдвиг векторов токов в оставшихся фазах до величины  $\pi/3$  радиан и, с учетом равенства МДС в фазах, выполняется условие сохранения кругового вращающегося поля двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Однокопылов, Г. И. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока : монография // Г. И. Однокопылов, И. Г. Однокопылов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.

2. Fu Jen-Ren, Lipo T. A. Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1994. – V. 30. – № 5. – P. 1267–1274.

3. Глухов, Д. М. Моделирование многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2005. – 18 с.

4. Конев, Ю. И. Микроэлектронные электро-системы. Применение в радиоэлектронике / Ю. И. Конев, Г. Н. Гулякович, К. П. Полянин и др. – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.

5. Кобзев, А. В. Многозонная импульсная модуляция (Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии) / А. В. Кобзев. – Новосибирск : Наука, 1979. – 304 с.

6. Однокопылов, Г. И. Исследование в среде Matlab Simulink трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме работы // Г. И. Однокопылов, А. Д. Брагин; «Технические науки — от теории к практике»: материалы XVI международной заочной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 125–130.

**Однокопылов Г. И.**, к.т.н., доцент, E-mail: [OGIz@yandex.ru](mailto:OGIz@yandex.ru); **Брагин А. Д.**, студент, E-mail: [iflenyol@gmail.com](mailto:iflenyol@gmail.com), Россия, г. Томск, Энергетический институт НИ ТПУ, кафедра «Электропривод и электрооборудование», +7(3822)56-37-29.