

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ АВАРИИ В ОДНОЙ ИЗ ФАЗ

Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев

Рассматривается проблема обеспечения живучести и отказоустойчивости трёхфазных электроприводов переменного тока. Рассмотрены принципы построения отказоустойчивых электроприводов со свойством живучести для вентильного и асинхронного двигателей. Представлены новые отказоустойчивые схемы и алгоритмы по восстановлению работоспособности для вентильного и асинхронного электроприводов.

Ключевые слова: отказоустойчивость, живучесть, электропривод переменного тока, отказ электропривода, трехфазный вентильный двигатель, трехфазный асинхронный двигатель.

Введение

Электропривод переменного тока (ЭПТ) построенный на основе вентильных (ВД) или асинхронных (АД) двигателей является основой построения практически всех сложных технических систем вращательного и поступательного принципа действия.

Вопросы отказоустойчивости ВД приобретают особое значение в связи с наметившимся широким применением ВД в автомобильном транспорте выполняемом на основе гибридных силовых установок на основе трехфазного ВД и отказом от классической схемы в перспективных разработках автомобилей всех классов; в связи с широким применением ВД в авиации, где для серийно выпускаемых и перспективных военных и гражданских самолетов признана концепция отказа от гидравлических систем с заменой на электромеханические, кроме того военная авиация строится с применением концепции аппарата конфигурируемого управлением с исходной неустойчивостью в полете самолета без прямого управления компьютером для обеспечения повышенных боевых технических характеристик. При этом от безотказного функционирования вентильных двигателей в составе электрооборудования самолета напрямую зависят жизни сотен людей.

Объекты транспортного комплекса обладают чрезвычайно большой опасностью, особенно при перевозках потенциально опасных грузов (взрывчатых и отравляющих веществ, оборонных грузов, авиационных и ракетных систем, ядерных материалов). Существует необходимость обеспечения безопасности и отказоустойчивости ЭПТ в составе насосных агрегатов при транспортировке газа, нефти и продуктов их переработки.

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.

Постановка задачи

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 ЭПТ задача обеспечения 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. Различают пять видов резервирования: структурное, функциональное, временное, информационное и нагрузочное, которые могут быть применены в электроприводе отдельно или в определенных комбинациях.

Известные устройства и способы обеспечения живучести ЭПТ на основе ВД и АД рассмотрены в работе [1].

Из имеющихся технических предпосылок построения системы электропривода и применения методов мехатроники можно рассматривать возможность обеспечения живучести в случае аварийного отключения одной из фаз трехфазного ЭПТ с позиций системы с ненагруженным (не полностью нагруженным) резервом. Из теории надежности известно, что работа систем с ненагруженным резервом очень эффективна, но имеет вполне конкретное время T_n переключения структуры при возникновении аварийной ситуации [2] определяющее неуправляемую стадию процесса переключения структуры электропри-

РАЗДЕЛ III. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

вода, в таком случае необходимо обеспечение временного резерва.

Предложен новый подход в обеспечении живучести ЭПТ за счет микроконтроллерного управления электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности в аварийной ситуации (в двухфазном режиме).

Известны условия существования кругового вращающегося магнитного поля в двухфазном режиме трехфазной электрической машины с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками (отказ в фазе А): $\delta + \beta = \pi$; $F_{BM} = F_{CM}$, где F_{BM} , F_{CM} – амплитудные значения магнитодвижущих сил фаз В и С; δ – угол пространственного сдвига обмоток, $\delta = 2\pi/3$; β – угол временного сдвига токов, $\beta = \pi/3$.

Обеспечение живучести в вентильном и частотно-регулируемом асинхронном электроприводе может быть достигнуто при выполнении следующих необходимых и достаточных условий в случае аварийной ситуации в одной из фаз трехфазного двигателя.

1. Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного ЭПТ как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации в одной из 3 фаз ЭПТ может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности. При этом обеспечивается функциональное резервирование – происходит переключение структуры силовых цепей.
2. Силовой преобразователь ЭПТ необходимо выполнить по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам с необходимым нагрузочным резервированием. С целью уменьшения времени переключения структуры электропривода T_n необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя).
3. ЭПТ должен иметь управляющий микроконтроллер с информационным резервом по вычислительной мощности. В микроконтроллере необходимо реализовать алгоритм восстановления работоспособности в аварийной ситуации с программным формированием заданий на

фазные токи. Работа микроконтроллера осуществляется с постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя.

4. ЭПТ необходимо выполнить по принципу подчиненного регулирования параметров. В минимальном составе ЭПТ должен содержать обратные связи по току. Контур тока для отработки заданного значения может быть аналоговым или цифровым. Контур обратной связи по частоте вращения непосредственно в реализации алгоритма восстановления не участвует.
5. ЭПТ должен иметь в составе силового преобразователя информационный резерв в виде датчиков состояния преобразовательных ячеек, которые вырабатывают три бита отказа а, b, с, поступающие в систему управления для отключения отказавшей фазы и реализации алгоритма восстановления. Программный опрос датчиков состояния должен осуществляться в каждом микроконтроллерном цикле управления.
6. В управляющем микроконтроллере должен быть заложен алгоритм, который заключается в формировании фазных токов двигателя с учетом отказавшей фазы.

Алгоритм будет зависеть от типа двигателя.

В электроприводе с вентильным двигателем [3] формируются задания на фазные токи I_A , I_B , I_C для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b + \arctg \omega L / r) \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c + \arctg \omega L / r + 2\pi/3) \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + \arctg \omega L / r + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

для отстающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c + \arctg \omega L / r) \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + \arctg \omega L / r + 2\pi/3) \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b + \arctg \omega L / r + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1, 2): I_ω – значение амплитуды формируемых фазных токов; α – значение текущего кода датчика положения ротора, $\alpha = 2^\sigma - 1 = 2\pi$ рад., 1 оборот вала двигателя: 2π рад.; σ – число двоичных разрядов выходного кода датчика положения ротора; $\arctg \omega L / r$ – угол сдвига фаз между током и напряжением для компенсации индуктивного сопротивления обмоток якоря с ростом частоты вращения; L – индуктивность фазной обмотки; r – активное сопротивление фазной

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ АВАРИИ В ОДНОЙ ИЗ ФАЗ

обмотки; p – число пар полюсов; ω – частота вращения; a, b, c – значение битов слова состояния электропривода по отказам (вырабатываются датчиками состояния преобразовательных ячеек); d – значение бита, вычисляемого по логическому выражению $d = aUbUc$ (U – логическая операция ИЛИ), если $d = 1$ – есть отказ в одной из фаз; $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ – инверсные значения a, b, c, d . В случае $a=b=c=d=0$, $\bar{a} = \bar{b} = \bar{c} = \bar{d} = 1$ система управления ВД работает в трехфазном режиме и логическое умножение на соответствующий бит отказа a, b, c значения $\pm\pi$ (в приведенных выше выражениях) обеспечивает формирование фазового сдвига тока $\pi/3$ в двухфазном режиме. Если один из битов отказа не нулевой – в оставшихся фазах реализуется алгоритм восстановления, а в отказавшую фазу управление не поступает (обеспечивается логическим умножением на соответствующий инверсный бит отказа $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$, который принимает нулевое значение).

В трехфазном режиме угол нагрузки $\theta = \pi/2$ задается пространственным сдвигом между корпусом статора электродвигателя и корпусом датчика положения ротора. Код угла α (сигнал выхода датчика положения ротора) уже содержит угол θ . В двухфазном режиме формируется модифицированный код

датчика положения ротора и задается углом γ : $\alpha + \psi_A - \theta$. Эта операция выполняется логическим умножением на бит d , при этом логическим умножением на бит $\bar{d}$ блокируется формирование угла $2^\sigma - 1 - \alpha$ в трехфазном режиме. При значении угла $\psi_A = \pi/6$ задается угол нагрузки, определяющий максимум активной мощности и момента на валу ВД [1]. Зона предпочтительных рабочих параметров лежит в диапазоне $\psi_A \pm \delta\psi_A$, где $\delta\psi_A$ – погрешность задания угла ψ_A . С целью минимизации реактивной мощности $\delta\psi_A < 0.1\psi_A$ и погрешность задания должна формироваться со знаком плюс.

При отказе в одной из трех фаз для аварийного двухфазного режима ВД относительно трехфазного режима с учетом сохранения перегрузочной способности и сохранения кругового вращающегося поля требуется обеспечить возможность формирования нагрузочного резерва по току в $1.5 \dots \sqrt{3}$ раз.

В электроприводе с асинхронным двигателем [4] формируются задания на фазные токи I_A, I_B, I_C для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c + \arctg \omega L / r) \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + \arctg \omega L / r + 2\pi/3) \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b + \arctg \omega L / r + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

для отстающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot c); \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot a + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot b + 4\pi/3). \end{aligned} \quad (4)$$

Для организации двухфазного режима работы трехфазного АД (аналогично ВД) в случае обрыва одной из фаз необходимо обеспечить равенство амплитудных значений токов в оставшихся двух фазах и обеспечить угол временного сдвига токов обмоток трехфазной электрической машины $\beta = \pi/3$. Эти два условия определяют существование кругового вращающегося магнитного поля. Равенство амплитудных значений токов может быть обеспечено обязательным наличием в структуре электропривода контура тока в каждой фазе.

Основные результаты

Из сравнения выражений (1), (2) и (3), (4) видно, что построение системы управления АД сравнительно проще, чем ВД: отсутствует необходимость учета угла нагрузки и как будет показано ниже учета коррекции угловой характеристики в трех- и двухфазных режимах в случае явнополюсной синхронной машины. На рисунке 1 приведена функциональная схема отказоустойчивого вентильного или асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести удовлетворяющая приведенным выше требованиям.

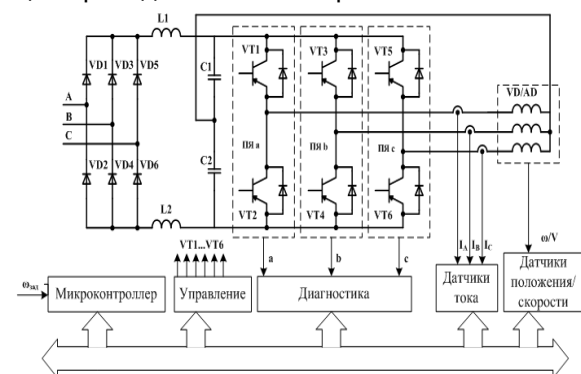


Рисунок 1 – Функциональная схема трехфазного вентильного или асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести.

Рассмотрим технические решения по реализации отказоустойчивого вентильного электропривода. Выражение для момента M_{vd3} трехфазного ВД имеет вид [5]:

РАЗДЕЛ III. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

$$Mvd3 = \Phi 2 \cdot w1e \cdot I1 \cdot \sin \theta, \quad (5)$$

где $\Phi 2$ – магнитный поток ротора; $w1e$ – эффективное число витков статорной обмотки; $I1$ – ток обмотки статора; θ – угол между вектором МДС статора и вектором магнитного потока ротора.

Магнитный поток ротора в трех и двухфазном режимах не изменится, однако ток статора ($I1$) уменьшится на 1/3 из-за выбытия из работы одной фазы. Поэтому выражение для момента $Mvd2$ трехфазного ВД в аварийном двухфазном режиме примет вид:

$$Mvd2 = \frac{2}{3} \cdot \Phi 2 \cdot w1e \cdot I1 \cdot \sin \theta. \quad (6)$$

Для восстановления работоспособности ВД необходимо увеличить ток в обмотках статора ($I1$) в 1,5 раза и сохранить значение $\sin \theta$ близкое к 1. На рисунке 2 представлен отказоустойчивый ВД со свойством живучести [6].

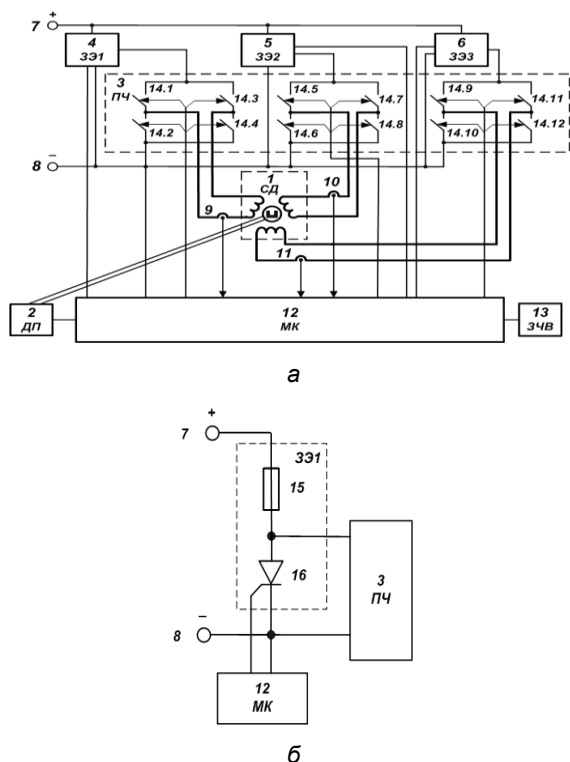


Рисунок 2 - Отказоустойчивый ВД: а) функциональная схема отказоустойчивой микроконтроллерной системы управления трехфазным ВД, б) схема защитного элемента.

Входной величиной электропривода является сигнал с датчика частоты вращения 13 (ЗЧВ). Из блока датчика положения ротора 2 (ДП) поступает в микроконтроллер 12 (МК) сигнал α углового положения вала синхронного электродвигателя 1 (СД), по которому микроконтроллер 12 (МК) вырабатывает сигналы

управления для силовых ключей 14.1–14.12 трехфазного преобразователя 3 (ПЧ), который формирует синусоидальные токи в фазных обмотках 1 (СД). По значениям сигналов с выходов датчиков тока 9, 10, 11 микроконтроллер 12 (МК) корректирует мгновенные значения фазных токов синхронного электродвигателя 1 (СД), при этом микроконтроллер 12 (МК) анализирует состояние каждой фазы преобразователя частоты 3 (ПЧ) на каждом интервале широтно-импульсной модуляции и в случае отказа в одной из фаз электродвигателя микроконтроллер 12 (МК) диагностирует ошибку работы одного из регуляторов тока и вырабатывает бит отказа той фазы, где произошла аварийная ситуация.

В случае выявления отказа в одной из фаз, микроконтроллер 12 (МК) включает выполнение алгоритма восстановления функционирования для обеспечения работы на двух оставшихся фазах. По биту отказа происходит выключение силовых ключей 14.1–14.12 отказавшего моста и включение соответствующего тиристора 16 защитных элементов 5 (ЗЭ1), 6 (ЗЭ2), 7 (ЗЭ3), плавкая вставка 15 перегорает и поступление напряжения на отказавший мост преобразователя частоты 3 (ПЧ) прекращается, в результате предотвращается аварийная ситуация при отказах электропривода типа: «невключение» или «невключение» силовых ключей или «обрыв обмотки» статора синхронного электродвигателя 1 (СД). Осуществляется блокирование отказавшей ячейки трехфазного преобразователя частоты за счет перегорания плавкой вставки по принудительно включаемому тиристор (вместо перегорания плавкой вставки по превышению допустимого значения тока), что позволяет обеспечивать заданную величину кратности пускового тока ВД.

Применение защитных элементов позволяет аналогично решить задачу блокирования аварийной ситуации и в асинхронном электроприводе с выполнением преобразовательных ячеек по мостовой схеме. В случае выполнения преобразователя частоты по полумостовой схеме на 6 ключах защитных элементов должно быть также 6.

Обеспечение отказоустойчивого управления для трехфазного ВД при отказе в одной из фаз выполненного на основе неявнополюсной (1), (2) и явнополюсной синхронной машины при аварийном отключении одной из фаз имеет различия [7] из-за изменения угловых характеристик.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ АВАРИИ В ОДНОЙ ИЗ ФАЗ

На рисунке 3 представлены временные диаграммы переходных процессов в рабочем 3-х фазном (единичное значение сигнала управления), и в аварийном 2-х фазном (нулевое значение сигнала управления) режимах работы с активизированным алгоритмом восстановления (1), (2) для явнополюсной синхронной машины.

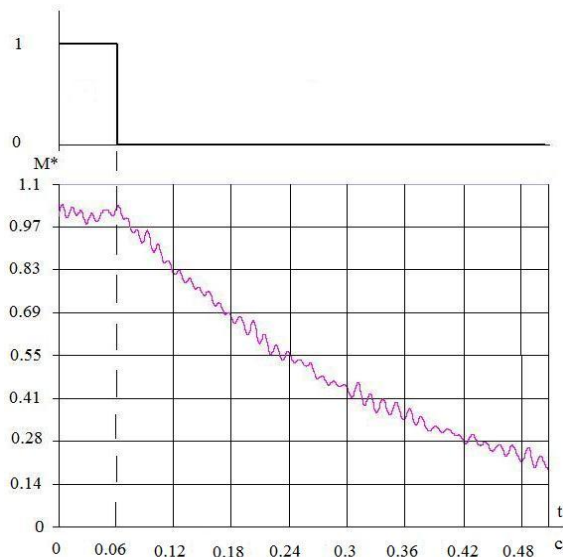


Рисунок 3 - Временные диаграммы переходных процессов в рабочем 3-х фазном (единичное значение сигнала управления), и в аварийном 2-х фазном (нулевое значение сигнала управления) режимах работы с активизированным алгоритмом восстановления (1), (2) для явнополюсной синхронной машины.

Из временных диаграмм переходных процессов (Рисунок 2) при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим работы видно, что момент ВД падает практически в 10 раз, т.е. не обеспечивается свойство живучести. Не обеспечивается сохранение значения $\sin\theta$ близким к 1. Поэтому для решения задачи обеспечения живучести трехфазного ВД на основе явнополюсной синхронной машины в аварийном двухфазном режиме необходимо ввести угол коррекции ϕ_K угловой характеристики.

На рисунке 4 представлены угловые характеристики ВД в трёхфазном и аварийном двухфазном режимах работы построенные для СД ДСТ–0.18.

Для определения значения угла коррекции ϕ_K угловой характеристики (для смещения угловой характеристики относительно максимума момента определенного для трехфазного режима работы, при котором обеспечивается максимум электромагнитного момента в двухфазном режиме работы явно-

поллюсной синхронной машины), необходимо измерить значения электромагнитного момента ВД $M_0, \dots, M_i, M_{i+1}$, где $i=1,2,\dots,n$, задавая пошаговое увеличение угла ϕ_{Ki} от 0 с шагом $\Delta\phi_K = \pi/n$, где n - количество шагов на полупериоде угловой характеристики.

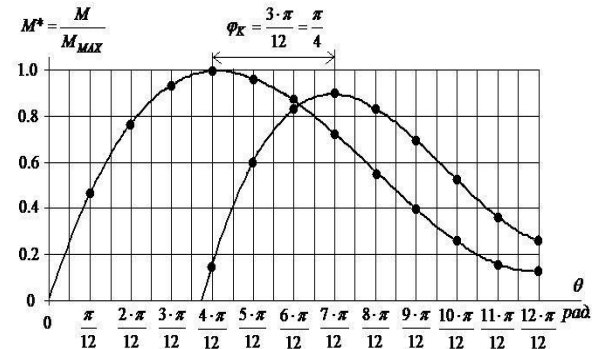


Рисунок 4 - Угловые характеристики ВД в трёхфазном и аварийном двухфазном режимах работы.

Далее необходимо сравнить последующее M_{i+1} и предыдущее M_i значения электромагнитного момента и при выполнении условия $M_{i+1} < M_i$ определить угол коррекции как ϕ_{Ki} , соответствующий значению максимального момента M_i . Как видно из рис. 4 максимум относительного момента $M^* = M/M_{MAX}$ в трёхфазном режиме при значении угла $\theta = 4\pi/12$ обеспечивает 100% электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины. В аварийном двухфазном режиме при значении угла $4\pi/12$ электромагнитный момент падает в 8 раз, то есть ниже уровня статического момента, в результате двигатель останавливается и алгоритм восстановления работоспособности (1), (2) не работает. Однако, если сместить рабочую точку на угловой характеристике на угол $\pi/4$, обеспечивая максимум электромагнитного момента в аварийном двухфазном режиме, то значение электромагнитного момента может быть практически полностью восстановлено, для чего необходимо ввести угол коррекции ϕ_K угловой характеристики в выражения (1) и (2).

Задания на фазные токи с учетом угла коррекции ϕ_K угловой характеристики формируются в случае обнаружения отказа в одной из фаз по выражениям для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \vec{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \phi_K) \cdot \vec{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b) \\ I_B &= I_\omega \cdot \vec{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \phi_K) \cdot \vec{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c + 2\pi/3) \\ I_C &= I_\omega \cdot \vec{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \phi_K) \cdot \vec{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (7)$$

и для отстающей фазы вектора тока:

РАЗДЕЛ III. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \varphi_K) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c) \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \varphi_K) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + 2\pi/3) \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha + \varphi_K) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (8)$$

На рисунке 5 приведены временные диаграммы переходных процессов в рабочем 3-х фазном, и в аварийном 2-х фазном режимах работы с активизированным алгоритмом восстановления (1), (2) для явнополюсной синхронной машины с учетом угла коррекции φ_K угловой характеристики.

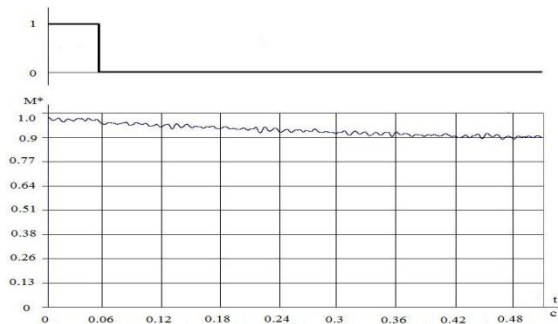


Рисунок 5 - Временные диаграммы переходных процессов в рабочем 3-х фазном (единичное значение сигнала управления), и в аварийном 2-х фазном (нулевое значение сигнала управления) режимах работы с активизированным алгоритмом восстановления (1), (2) для явнополюсной синхронной машины с учетом угла коррекции φ_K угловой характеристики.

Из рисунка 5 временных диаграмм переходных процессов при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим работы видно, что при учёте угла коррекции φ_K угловой характеристики падение частоты вращения и вращающего момента составляет не более 10%. То есть использование предложенного способа обеспечивает живучесть трехфазного ВД.

Рассмотрим технические решения по реализации отказоустойчивого АД. Выражение для момента M_{ad3} трехфазного АД имеет вид [8]:

$$M_{ad3} = c \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (9)$$

где:

c – конструктивный коэффициент, определяемый числом фаз, полюсов и витков обмоток статора и ротора, $c = 3 \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 / \omega_0$,
 Φ_1 – магнитный поток одного полюса;
 I_2 – ток фазы обмотки ротора;
 φ_2 – угол между вектором тока обмотки ротора и вектора ЭДС,
 f_1 – частота напряжения на обмотке статора;
 k_{02} – обмоточный коэффициент роторной обмотки;
 w_2 – число витков обмотки фазы;

ω_0 – частота вращающегося магнитного поля.

Из-за выбытия из работы одной фазы электромагнитная мощность статора уменьшается на 1/3 (каждый третий полюс статора не вырабатывает электромагнитную мощность), кроме того, среднее значение тока фазы обмотки ротора I_2 уменьшается на 1/3 (каждый третий полюс ротора не получает электромагнитную мощность от соответствующего полюса статора), Поэтому выражение для момента M_{vd2} трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме примет вид:

$$M_{ad2} = \frac{4}{9} \cdot c \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (10)$$

Падение в 2,25 раза момента АД предполагает ограничение рабочих параметров трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме или принятие мер по формированию нагрузочного резерва двигателя.

Известно, что повышение рабочей частоты тока статора f АД приводит к увеличению рабочей мощности P двигателя при фиксированном значении момента M на валу АД. Это следует из выражения[9]:

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f / p.$$

В случае обнаружения отказа в одной из фаз двигателя увеличение частоты тока статора f в k раз в двух оставшихся фазах приведет к увеличению рабочей мощности двигателя и соответственно может скомпенсировать падение частоты вращения вала двигателя[10]. Коэффициент k нелинейно зависит от заданной частоты вращения. Регулировочная характеристика коэффициента k от относительной частоты вращения ω^* получена на основе моделирования и представлена на рисунке 6.

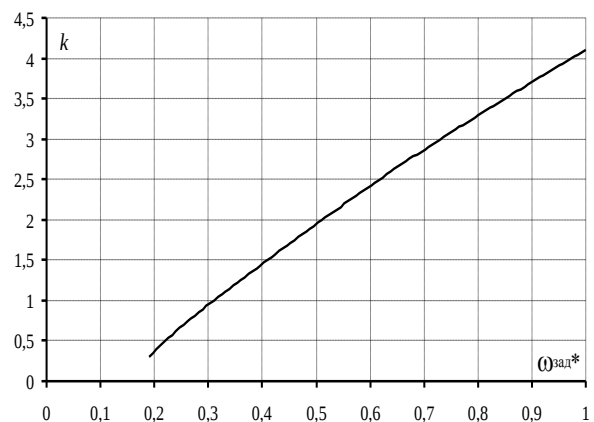


Рисунок 6 - Характеристика зависимости коэффициента k от заданной частоты вращения вала АД $\omega_{зад}^*$ в относительных единицах.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ АВАРИИ В ОДНОЙ ИЗ ФАЗ

Микроконтроллер формирует задания на фазные токи I_A, I_B, I_C для опережающей фазы вектора тока по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot b); \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot c + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot a + 4\pi/3), \end{aligned} \quad (11)$$

и для отстающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot b); \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot c + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t_3 \cdot p \cdot \bar{d} + 2\pi \cdot f \cdot k \cdot t_2 \cdot p \cdot d \pm \pi \cdot a + 4\pi/3), \end{aligned} \quad (11)$$

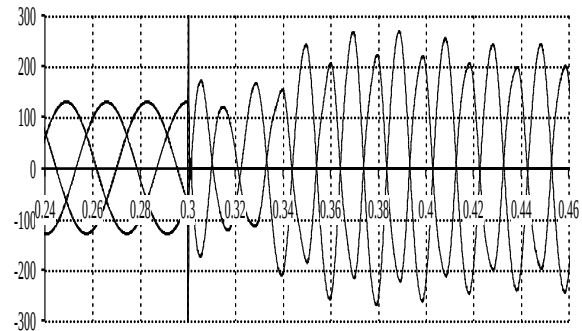
где: p – число пар полюсов АД; t_3 – текущий прямой отсчет меток таймера в трехфазном режиме; t_2 – текущий обратный отсчет меток таймера в двухфазном режиме с момента аварийного переключения структуры управления двигателем; f – частота тока статора.

На временных диаграммах переходных процессов (рис.7,8) представлена работа АД марки МТФ 311-6 с номинальным моментом нагрузки ($M_n=111\text{Н}\cdot\text{м}$) на валу при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим работы при отказе в фазе «А» в момент времени равным $t = 0,3$ с. Ток в отказавшей фазе («А») стал равным нулю. В оставшихся фазах «В» и «С» после электромагнитного переходного процесса произошло обратное чередование токов, возросла амплитуда токов в 1,5 раза, и сдвиг фаз между ними стал равным $\pi/3$, что определено алгоритмом восстановления (11) и (12) для поддержания кругового вращающегося поля двигателя. Частота вращения вала двигателя после отказа фазы упала с 37 рад/с до 26 рад/с (30% относительно работы в трехфазном режиме). Двигатель продолжает работать, поддерживая номинальную нагрузку на валу.

На рисунке 8 видно, что токи в двух оставшихся фазах «В» и «С» остались той же амплитуды как и на рис. 7, но с частотой в k раз больше. Частота вращения вала двигателя ω после электромеханического переходного процесса осталась на уровне трехфазного режима – 37 рад/с. Для двигателя МТФ 311-6: $k=1,4$ при заданной частоте вращения $\omega = 37$ рад/с.

Предложенное техническое решение позволяет в случае отказа в одной из фаз электропривода (выход из строя силового ключа инвертора, обрыв фазы двигателя) обеспечить сохранение направления вала двигателя и величины частоты вращения на

$U_A, U_B, U_C; V$



$I_A, I_B, I_C; A. \omega, \text{ рад/с}$

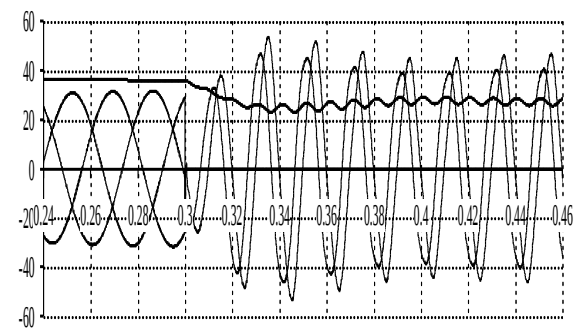
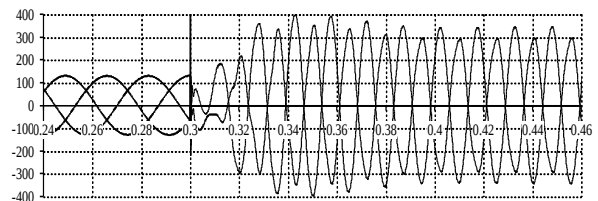


Рисунок 7 - Временные диаграммы переходных процессов напряжений статора: U_A, U_B, U_C , токов статора: I_A, I_B, I_C , и частоты вращения вала двигателя ω при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим АД с алгоритмом восстановления (7), (8).

$U_A, U_B, U_C; V$



$I_A, I_B, I_C; A. \omega, \text{ рад/с}$

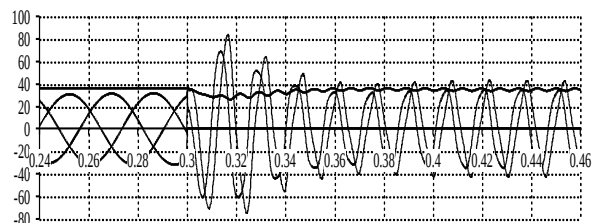


Рисунок 8 - Временные диаграммы переходных процессов напряжений статора: U_A, U_B, U_C , токов статора: I_A, I_B, I_C и частоты вращения вала двигателя ω при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим АД с алгоритмом восстановления (11), (12).

РАЗДЕЛ III. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

номинальном уровне и определенным временем реакции микропроцессорной системы управления при переключении алгоритма восстановления из трехфазного в двухфазный режим, равным времени интервала широтно-импульсной модуляции при отсутствии дополнительных аппаратных затрат для поддержки алгоритма восстановления работоспособности.

Данное техническое решение накладывает ограничения на использование трехфазного асинхронного электропривода на высоких частотах вращения. Изменение частоты тока статора может привести к увеличению фазных напряжений, что не допустимо, поэтому диапазон регулирования целесообразно ограничить от минимальной частоты вращения до частоты вращения соответствующей номинальному напряжению статора.

Алгоритмы отказоустойчивого управления АД (3), (4) относительно сложны в реализации и могут быть упрощены с соответствующим сокращением длительности электромагнитных переходных процессов при переключении в аварийный двухфазный режим для трехфазного АД при аварийном отключении одной из фаз [11].

Микроконтроллер формирует задания на фазные токи I_A , I_B , I_C для опережающей фазы вектора тока по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin(\alpha - \pi/3 \cdot b); \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin(\alpha - \pi/3 \cdot c + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin(\alpha - \pi/3 \cdot a + 4\pi/3), \end{aligned} \quad (13)$$

для отстающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin(\alpha + \pi/3 \cdot c); \\ I_B &= I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin(\alpha + \pi/3 \cdot a + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin(\alpha + \pi/3 \cdot b + 4\pi/3). \end{aligned} \quad (14)$$

Технический результат, состоит в том, что в предложенном техническом решении поворот вектора тока в одной из фаз в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД осуществляется на угол $\pi/3$ для получения результирующего сдвига векторов тока $\pi/3$, тогда как в алгоритме (3), (4) поворот вектора тока в одной из фаз в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД осуществляется на угол π для получения результирующего сдвига векторов тока $\pi/3$, как следствие в алгоритме (3), (4) происходит изменение порядка чередования векторов МДС в фазах двигателя, что приводит к реверсу двигателя, для устранения этого в алгоритме восстановле-

ния работоспособности (3), (4) выполняется реверсивное формирование синусоид тока.

В алгоритме (13), (14) не происходит изменения порядка чередования векторов МДС в фазах двигателя, что существенно упрощает алгоритм восстановления работоспособности, сокращается программа и экономится вычислительный ресурс микроконтроллера. Кроме того сокращение угла поворота вектора тока с π на угол $\pi/3$ —в 3 раза, также приводит к сокращению переходных электромагнитных процессов в двигателе при активизации алгоритма восстановления и уменьшению времени переключения структуры электропривода, времени нахождения электропривода в аварийном состоянии в процессе изменения вращающегося поля статора с эллиптического на круговое—основного показателя характеризующего качество обеспечения живучести электропривода в процессе ликвидации аварийной ситуации.

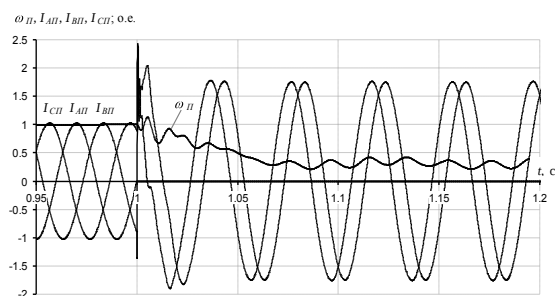


Рисунок 9 - Временные диаграммы переходных процессов токов статора в фазах А, В, С: IАП, IВП, IСП, и частоты вращения вала двигателя ω_P при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим при работе алгоритма восстановления работоспособности (3), (4).

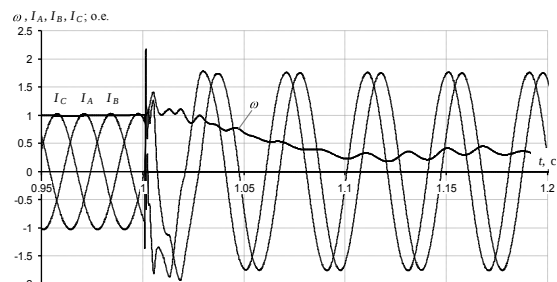


Рисунок 10 - Временные диаграммы переходных процессов токов статора в фазах А, В, С: IА, IВ, IС, и частоты вращения вала двигателя ω при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим при работе алгоритма восстановления работоспособности (13), (14).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ АВАРИИ В ОДНОЙ ИЗ ФАЗ

На временных диаграммах переходных процессов рисунок 9,10,11 представлена работа АД марки МТФ 311-6 на номинальной нагрузке с частотой тока статора 25Гц при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим работы при отказе в фазе «А» в момент времени равным $t=0,5$ с. Индексом «п» на рисунке 9 и рисунке 11 обозначены диаграммы соответствующие алгоритму (3), (4) для токов и частоты вращения. Значения частот вращения и токов на рисунках 9,10,11 приведены в относительных единицах.

Из сравнения временных диаграмм видно, что сокращение угла поворота вектора тока с π рад. на угол $\pi/3$ рад. – в алгоритме (3), (4), приводит к снижению частоты вращения, тогда как в алгоритме (13), (14) это снижение отсутствует. Кроме того из сравнения диаграмм алгоритмов (3), (4) и алгоритмов (13), (14) видно, что на интервале времени 0.5...0.593с работы алгоритма восстановления работоспособности в алгоритме (13), (14) падение частоты вращения на 40...50% медленнее чем в алгоритме (3), (4).

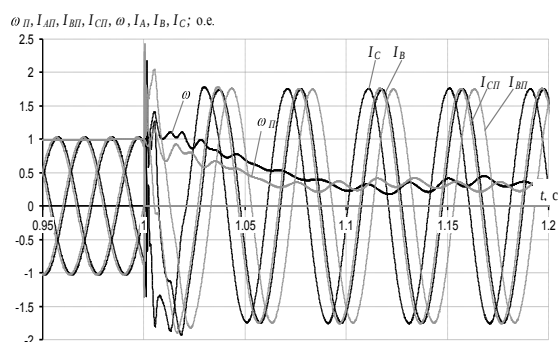


Рисунок 11 - Временные диаграммы переходных процессов токов статора в фазах А, В, С: I_{Ap} , I_{Bp} , I_{Cp} , I_A , I_B , I_C , и частоты вращения вала двигателя ω_p , ω при переключении из рабочего 3-х фазного в аварийный 2-х фазный режим с совмещением временных диаграмм рисунок 9 и рисунок 10

Выводы

1. Разработанная схема электропривода переменного тока на основе блокирующих элементов обеспечивает отказоустойчивость вентильного электропривода при отказе одной из фаз с заданной кратностью пускового тока двигателя.
2. Применение угла коррекции угловой характеристики в алгоритме восстановления работоспособности трехфазного ВД на основе явнополюсной синхронной машины позволяет обеспечить 100%

восстановление момента по сравнению с провалом момента до уровня 10% в случае неучета угла коррекции угловой характеристики в алгоритме восстановления.

3. Предложенный способ восстановления работоспособности трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме позволяет скомпенсировать спад момента в 2,25 раза за счет повышения частоты фазных токов и обеспечить 100% восстановление работоспособности двигателя по моменту и частоте вращения.
4. Предложенный способ восстановления работоспособности трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме позволяет получить за счет изменения поворота вектора тока отказавшей фазы с π рад. на угол $\pi/3$ рад. — сокращение длительности переходных электромагнитных процессов в двигателе в 3 раза при активизации алгоритма восстановления и уменьшение времени переключения структуры электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография [Текст]. /Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов/ –Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
2. Т.Исии, И.Симояма, Х. Иноуэ Мехатроник. Пер. с япон. [Текст]. / Т.Исии, И.Симояма, Х. Иноуэ и др/ – М.: Мир, 1988. – 318 с.
3. Патент РФ на изобретение № 2311721, МПК H02P 6/12, H02P 6/16, H02K 29/06, Способ обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигателя /Г.И.Однокопылов, К.В.Образцов,-№ 2006128538; заявлено 04.08.2006 г.; опубл. 27.11.2007г. Бюл. №33.
4. Патент РФ на изобретение № 2326480, МПК H02N 7/09, H02N 7/12, Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И.Однокопылов, И.Г.Однокопылов, - № 2007112527; заявлено 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008г. Бюл. №16.
5. Овчиников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Учебное пособие [Текст]/И.Е. Овчинников. — Сант-Петербург: КОРОНА-Век, 2007. — 336 с. – С.31.
6. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 19.10.2011, Вентильный электропривод с обеспечением свойства живучести /Г.И.Однокопылов, Ю.Н.Дементьев, И.Г.Однокопылов, К.В.Образцов – №2011112102; Заявл. от 30.03.2011.
7. Патент РФ на изобретение № 2435291, МПК H02P 6/12, H02P 6/16, Способ обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигате-

РАЗДЕЛ III. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

- ля на основе явнополюсной синхронной машины /Г.И.Однокопылов, К.В.Образцов, - № 2010135857; заявлено 26.08.2010г.; опубл. 27.11.2011г. Бюл. №33.
8. Зайцев А.П. Общая электротехника и электроника. Учебное пособие. [Текст] —Томск: STT, 2003.— 342с. — С.177.
9. Общий курс электропривода: учебное пособие. [Текст]. / М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер/ — 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с. — С. 101.
10. Патент РФ на изобретение № 2410813, МПК H02H 7/09, H02P 27/02, Способ обеспечения живучести трёхфазного асинхронного электропривода/ Г.И.Однокопылов, И.Г.Однокопылов, К.В.Образцов - № 2009148840; заявлено 28.12.2009 г.; опубл. 27.01.2011г. Бюл. №3.
11. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 02.27.2012, Способ управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя вращательного и поступательного движения /Г.И.Однокопылов, Ю.Н.Дементьев, И.Г.Однокопылов, Й.Центнер — №2011113290; Заявл. от 06.04.2011.
- к. т. н, Однокопылов Г. И., докторант. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. д. т. Н. Букреев В. Г., профессор. Национальный исследовательский Томский политехнический университет.*

УДК 662.997.05(043)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРУГОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

А.В. Юрченко, Ф.В. Саврасов, А.В. Охорзина

В работе проанализирована работа кругового фотоэлектрического устройства, конструкция которого представляет собой восьмиугольную призму. Устройство обеспечивает максимальный сбор солнечного излучения, как прямого излучения, так и отраженного и рассеянного. Увеличение генерации энергии в солнечный день достигает 40%.

Ключевые слова: фотоэлектрическое устройство, слежение за Солнцем, эффективность, контроль

Введение

Солнечная энергетика, наряду с другими природными источниками энергии (ветер, вода, тепло и др.), является перспективным заменителем топливной энергетики на ископаемых ресурсах. Количество солнечной энергии, приходящей на поверхность Земли, во много раз превышает мощность всех генерирующих объектов на Земле вместе взятых.

Однако применение электрогенерирующих объектов на основе фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии в настоящее время сдерживается по ряду причин:

- дороговизна производства солнечного кремния;
- относительно низкий КПД преобразователей (14-17)%;
- нестабильность параметров и др.

Общеизвестно, что производительность солнечного элемента существенно зависит от интенсивности потока солнечной радиации, падающей на его приёмную поверхность, воздействия рассеянного и отражённого света, материала элемента, температуры окружающей среды и ряда других факторов. [1]

Известно, что слежение солнечных батарей (СБ) за движением Солнца, обеспечивает увеличение выработанной электрической энергии по сравнению со стационарно (на юг) установленными солнечными батареями [2]. Научный и практический интерес представляет установление прироста энергии г. Томска при использовании кругового фотоэлектрического устройства, а, следовательно, и для всей местности, лежащей на данной географической широте.

В статье проанализирована работа кругового фотоэлектрического устройства. При этом другие воздействующие факторы считались неизменными.

Исследование проводилось в г. Томске в период с 21 апреля по 27 мая 2011 года. Контрольное время с 6.00 до 21.00.

Исследование проводилось путём сравнения суточной производительности неподвижного солнечного модуля, ориентированного на ЮГ под углом максимального солнцестояния в полдень на широте г. Томска, и солнечного модуля, приёмная поверхность которого в любой момент светового дня расположена перпендикулярно к световому по-