

## СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В РЕЖИМАХ РАБОТЫ С НЕПОЛНЫМ ЧИСЛОМ ФАЗ

ГОЛУБЕВ А.Н., д-р техн. наук, САЙФУЛЬМУЛЮКОВ Ф.И., магистр

Приведена математическая модель  $m$ -фазного синхронного двигателя в режимах работы с неполным числом фаз статорной обмотки. На основе результатов моделирования показано, что в указанных режимах регулировочные характеристики машины в отношении пульсаций электромагнитного момента становятся сопоставимыми с показателями 3-фазного двигателя.

*Ключевые слова:* математическая модель, многофазные синхронные двигатели, синхронный электропривод, надежность.

## SYNCHRONOUS DRIVE IN OPERATING REGIMES WITH PHASE INCOMPLETE COUNT

A.N. GOLUBEV, Ph.D., F.I. SAIFUL'MYLYUKOV, holder of a master's degree

This paper is devoted to the mathematical model of  $m$ -phase synchronous motor in operating regimes with stator coil phase incomplete count. Using the results of simulation, the authors have shown that machine regulation characteristics concerning electromagnetic torque pulsations in behavior mentioned become comparable with those of three-phase motor.

*Key words:* mathematical model, multiphase synchronous motors, synchronous drive, reliability.

Одним из важнейших требований, выдвигаемых при проектировании электромеханической системы, является ее высокая надежность. Для электроприводов (ЭП) специального назначения, например автономных, повышение их функциональной надежности и снижение критичности к параметрам потребляемой от источника мощности приобретают первостепенное значение. Перспективным направлением решения данной задачи, позволяющим оптимизировать также целый ряд других технико-экономических показателей ЭП [1], является его реализация на основе исполнительного двигателя переменного тока с увеличенным числом фаз статорной обмотки, в частности  $m$ -фазного ( $m > 3$ ) синхронного двигателя (СД). Это связано с принципиальной работоспособностью  $m$ -фазной машины в режимах работы с неполным числом фаз, поскольку при выходе из строя или аварийном отключении некоторого числа из них в двигателе продолжает создаваться вращающееся магнитное поле [2, 3]. Один из основных способов повышения надежности системы основан на преднамеренном введении ее структурной избыточности, что в специальной литературе получило название резервирования [4]. В этом аспекте некоторое число фаз  $m$ -фазной машины можно рассматривать как нагруженный резерв, так как в случае выхода их из строя ЭП оказывается способным определенное время выполнять свои функции. Следует отметить, что при таком подходе вопрос определения реального резерва должен решаться с учетом конкретных технологических требований к электромеханической системе.

Одной из основных причин отказа ЭП является выход из строя силового коммутатора инвертора. Вероятность безотказной работы устройства коммутации одной фазы характеризуется соотношением

$$P_1(T_3) = e^{-\lambda_0 T_3 L_{исп}},$$

где  $\lambda_0$  – поток отказов одного силового ключа;  $T_3$  – заданное время наработки на отказ;  $L_{исп} = 0,5$  – коэффициент использования элемента.

При допущении, что потоки отказов силовых коммутаторов при  $m = var$  одинаковы, вероятность безотказной работы  $m$ -фазного инвертора определя-

ется выражением  $P_m(T_3) = (P_1(T_3))^m$ . Принимая во внимание, что  $P_1(T_3) < 1$ , налицо снижение надежности преобразователя частоты (ПЧ) с ростом числа его фаз по экспоненциальному закону. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев отказ отдельного элемента вызывает отказ всей системы или ее значительной части. Совершенно иначе обстоит дело при рассмотрении некоторого числа фаз исполнительного двигателя как нагруженного резерва. В этом случае при расщепленном исполнении статорной обмотки машины ( $m$ -фазная обмотка выполнена в виде  $m/N$  симметричных  $N$ -фазных групп) и использовании групповой защиты за один элемент следует принять всю  $N$ -фазную систему, которая отключается от источника (теряет работоспособность) при выходе из строя любого из  $2N$  силовых коммутаторов. В качестве примера представлена схема аварийного обесточивания с помощью короткозамыкающего тиристора группы фаз при пробое силового ключа, коммутирующего одну из фаз (рис. 1). При расчете вероятности безотказной работы силовой части ПЧ может быть использовано соотношение [4]

$$P_c(T_3) = \sum_{i=0}^{l-k} C_e^i \sum_{j=0}^i (-1)^j C_j^i e^{-\lambda_0 (l-j+i) T_3},$$

где  $C_e^i$  и  $C_j^i$  – соответствующие числа сочетаний;  $l$  – общее число элементов;  $k$  – число элементов, обеспечивающих работоспособность системы.

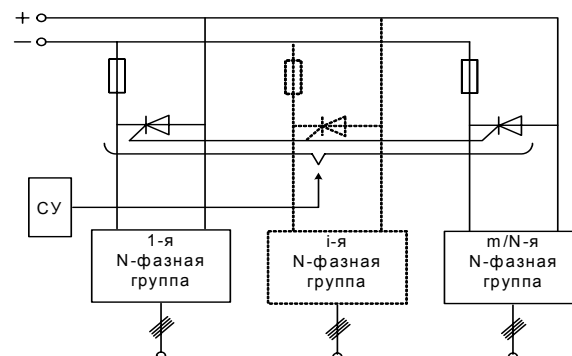


Рис. 1. Схема групповой защиты  $m$ -фазного инвертора

Аналогично можно рассмотреть влияние резервирования при симметричном исполнении статорной обмотки машины ( $m/N = 1$ ). В этом случае в качестве элемента следует рассматривать один силовой ключ коммутирующего устройства. Анализ расчетных диаграмм вероятности безотказной работы (принято:  $\lambda_0 = 0,3136 \cdot 10^{-4}$ ,  $T_3 = 10^4$  ч) при резервировании  $n = 1 - k$  фаз для обоих вариантов исполнения обмотки статора (рис. 2) позволяет сделать заключение о повышении вероятности безотказной работы ПЧ с увеличением числа фаз ЭП. Хотя при проведении этих расчетов не учитывалось изменение регулировочных характеристик самой электромеханической системы, тенденция роста принципиальной работоспособности ЭП с увеличением числа фаз достаточно наглядна.

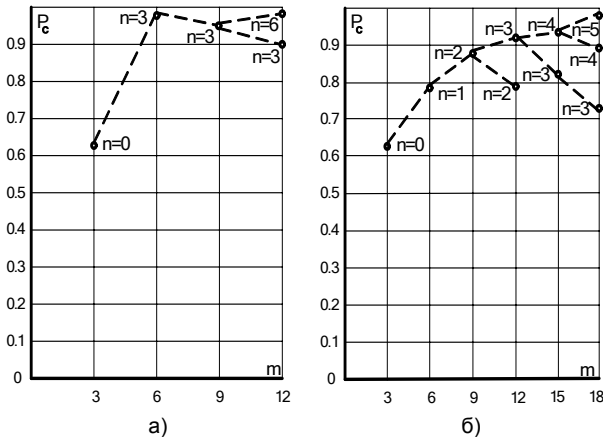


Рис. 2. Показатели надежности силовой части  $m$ -фазных ПЧ: а –  $m/N > 1$ ; б –  $m/N = 1$

Работа  $m$ -фазной машины при выходе из строя  $n$  фаз не сводится механически к функционированию двигателя, изначально спроектированного на  $(m-n)$  фаз. Помимо изменения энергетических характеристик двигателя, аварийное уменьшение числа работающих фаз приводит в общем случае к асимметрии самого режима его работы. Это достаточно наглядно иллюстрируют ортогональные составляющие векторов напряжения статора (рис. 3), приведенные к первой ( $v = 1$ ) пространственной гармонической, [5]

$$\bar{U}_{s(v)} = \frac{m}{2} \sum_{l=1}^{m/N} \sum_{k=1}^N u_{sik} e^{j\pi[\frac{2}{N}(k-1) + \frac{1}{m}(l-1)]} \quad (1)$$

при отключении третьей 3-фазной группы для  $m = 9$  и третьей и четвертой групп для  $m = 12$  при форме кривой изменения потенциала выходного зажима инвертора, соответствующей меандру. Для удобства сопоставления приведены составляющие  $\bar{U}_{s(1)}$  для 6-фазного двигателя в нормальном режиме.

Анализ представленных кривых показывает, что при отключении одной 3-фазной системы у 9-фазного двигателя и двух у 12-фазного вектор  $\bar{U}_{s(1)}$  принимает на комплексной плоскости двенадцать фиксированных положений, что соответствует нормальному режиму работы 6-фазной машины. Однако эпюры составляющих  $\bar{U}_{s(1)}$  для аномальных режимов теряют исходную симметрию и имеют различную длительность ступенек. Кроме того, модуль вектора  $\bar{U}_{s(1)}$ , в отличие от симметричного режима, пульсирует по величине. Поскольку  $\bar{U}_{s(v)}$  можно рас-

сматривать как вектор, питающий эквивалентную  $v$ -ю 2-фазную машину [5], указанное при одинаковом числе функционирующих фаз определяет различные регулировочные свойства двигателя при отключении фаз и двигателя в симметричном режиме.

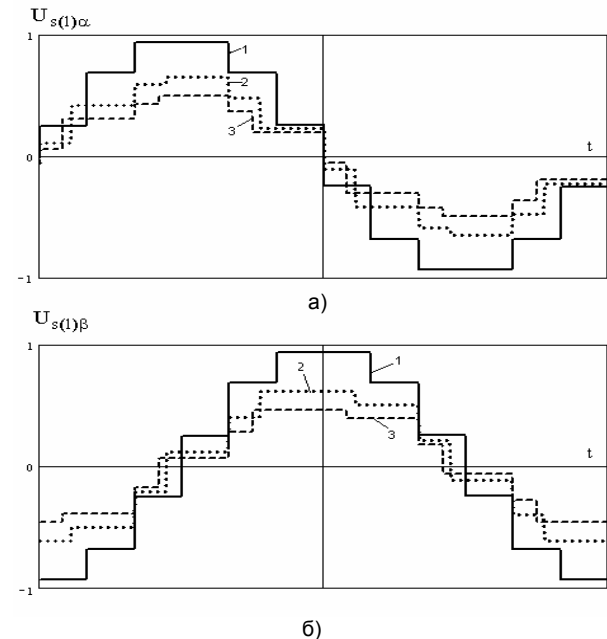


Рис. 3. Ортогональные составляющие: а –  $U_{s(1)\alpha}$ ; б –  $U_{s(1)\beta}$ ; 1 –  $m = 6$ ; 2 –  $m = 9$  при отключении третьей 3-фазной группы; 3 –  $m = 12$  при отключении третьей и четвертой 3-фазных групп

Невозможность при исследовании рассматриваемого типа аномальных режимов формального перехода на уменьшенное число фаз в симметричном режиме требует наличия адекватной модели, которая может быть получена на базе математического описания  $m$ -фазного СД [5] путем использования следующего приема: на обесточенные фазы подаются напряжения, равные наводимым на них ЭДС от изменяющегося потока, с последующим учетом этих напряжений в спектральных векторах  $\bar{U}_{s(v)}$ , поступающих на входы  $v$ -х подструктур модели СД. Таким образом, предлагаемый подход предполагает введение в расчетную структуру внешнего контура с положительной обратной связью по ЭДС, охватывающего исходную (для симметричного режима) модель  $m$ -фазного СД. Следует отметить, что принципиально ЭДС может быть определена путем численного дифференцирования потокосцепления соответствующих фаз. Однако в условиях наличия положительной обратной связи в модели такой подход, в связи с накоплением ошибки, может обусловить, помимо необходимости существенного уменьшения шага интегрирования, неустойчивость процесса численного эксперимента. Таким образом, задача сводится к нахождению ЭДС, наводимых на обесточенных фазах, без использования в явном виде операции дифференцирования.

При выходе из строя (обесточивании)  $i$ -й  $N$ -фазной группы статорной обмотки СД для ее потокосцепления можно записать [5]

$$\bar{\Psi}_{siv} = \frac{N}{2} \sum_{n=v+NQ}^{\infty} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} (L_m a(n) \sum_{l=1}^{m/N} \bar{I}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-l)} + M \times \\ \times b(2n) \sum_{l=1}^{m/N} \bar{I}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-l)} e^{j2nx}) + M_f i_f \sum_{n=1}^{\infty} C(n) e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} e^{jnx}, \quad (2)$$

при этом уравнение электромагнитного баланса имеет вид

$$\bar{U}_{siv} = p \bar{\Psi}_{siv}, \quad (3)$$

где  $p$  – символ дифференцирования.

Физический смысл и выражения коэффициентов и параметров, входящих в (2), приведены в [5].

С учетом (3) выражение (1) для спектрально-го вектора напряжения статора  $\bar{U}_{s(v)}$  при обесточенной  $i$ -й  $N$ -фазной группе можно записать как

$$\bar{U}_{s(v)} = \bar{U}_{(v)} + \frac{N}{m} p \bar{\Psi}_{siv} e^{jv\frac{\pi}{m}(i-1)} = \bar{U}_{s(v)} + \frac{N}{m} \bar{U}_{siv} e^{jv\frac{\pi}{m}(i-1)}, \quad (4)$$

где  $\bar{U}_{(v)}$  определяется согласно (1) при  $l \neq i$ , а

$$\bar{U}_{siv} = \sum_{n=v+NQ}^{\infty} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} p \left[ L_{m(n)} \bar{I}_{s(n)} + M_{(2n)} \hat{I}_{s(n)} e^{j2nx} + M_{f(n)} i_f e^{jnx} \right] = \\ = \sum_{n=v+NQ}^{\infty} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} p \left[ (L_{m(n)} \bar{I}_{s(n)}^p + M_{(2n)} \hat{I}_{s(n)}^p + M_{f(n)} i_f e^{jnx}) \right], \quad (5)$$

где  $\bar{Y}_{(n)}^p = \bar{Y}_{(n)} \exp(-jnx)$  – вектор, приведенный к декартовой системе координат  $d$ - $q$  ротора.

Выражения входящих в (5) производных могут быть получены из уравнений электромагнитного баланса статорной и роторной цепей:

$$p \left[ L_{m(n)} \bar{I}_{s(n)}^p + M_{(2n)} \hat{I}_{s(n)}^p + M_{f(n)} i_f \right] = \quad (6)$$

$$= \bar{U}_{s(n)}^p - R_s \bar{I}_{s(n)}^p - jn\omega \bar{\Psi}_{s(n)}^p;$$

$$p \left[ L_f i_f + \sum_{n=1} \operatorname{Re}(M_{f(n)} \bar{I}_{s(n)}^p) \right] = u_f - R_f i_f. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) записаны при ограничении в них спектра пространственных гармоник  $n$  значениями, меньшими числа фаз  $m$ , т.е. число уравнений вида (6) равно  $B = m [(N - 1) / 2 + 0,5] / N$ , где  $[ ]$  – оператор выделения целой части. Данное ограничение является достаточно корректным при  $m \geq 7 \dots 9$  [5]. Следует отметить, что в случае выхода из строя одной 3-фазной группы у 6-фазного СД в силу пространственной симметрии осей фаз задача сводится к моделированию 3-фазной машины. Таким образом, несмотря на указанное ограничение величинами  $m$ , рассматриваемый подход является достаточно общим. Для  $m$ -фазного СД с постоянными магнитами ( $i_f = \text{const}$ ) на основании (6) и (7), учитывая, что при  $n = v + NQ$   $\bar{Y}_{iv} = \bar{Y}_{in}$ , для искомого вектора  $\bar{U}_{siv}$  можно записать

$$\bar{U}_{siv} - \frac{N}{m} \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} e^{jnx} \left[ \operatorname{Re} \left( K_{s(n)d} \bar{U}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(i-1)} e^{-jnx} \right) + \right. \\ \left. + j \operatorname{Im} \left( K_{s(n)q} \times \bar{U}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(i-1)} e^{-jnx} \right) \right] = \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} e^{jnx} \times \\ \times \left[ \left[ K_{s(n)d} (U_{(v)d}^p - R_s I_{s(v)d}^p + n\omega \Psi_{s(v)q}^p) - n\omega (\Psi_{s(v)q} - \right. \right. \\ \left. \left. - I_{s(v)q}^p) \right] + j \left[ K_{s(n)q} (U_{(v)q}^p - R_s I_{s(v)q}^p - n\omega \Psi_{s(v)d}^p) + \right. \right. \\ \left. \left. + n\omega (\Psi_{s(v)d} - I_{s(v)d}^p) \right] \right], \quad (8)$$

где  $K_{s(n)d} = (L_{m(n)} + M_{(2n)}) / (L_{s(n)} + M_{(2n)})$ ;

$$K_{s(n)q} = (L_{m(n)} - M_{(2n)}) / (L_{s(n)} - M_{(2n)}).$$

Следует отметить, что при исследовании регулировочных характеристик ЭП при выходе из строя одной  $N$ -фазной группы статорной обмотки СД следует положить  $i = 1$ , что существенно упрощает аналитическое выражение  $\bar{U}_{siv}$  из (8).

Как показывает анализ соотношения (8), сложность выражения в его правой части определяется неравенством параметров  $K_{s(n)d}$  и  $K_{s(n)q}$ . В случае неявнополюсного СД  $M_{(2n)} = 0$ , что обуславливает равенство  $K_{s(n)d} = K_{s(n)q} = K_{s(n)}$ . Тогда, учитывая, что уравнение (7) включает в себя только переменные по продольной оси  $d$  ротора, ортогональная составляющая  $p \bar{I}_{s(n)}^p$  по оси  $q$  ротора может быть непосредственно получена из (6):

$$p I_{s(n)q}^p = \frac{1}{L_{s(n)}} \left[ U_{s(n)q}^p - R_s I_{s(n)q}^p - n\omega \Psi_{s(n)d}^p \right]. \quad (9)$$

Для определения составляющих  $p \bar{I}_{s(n)}^p$  по

оси  $d$  следует выражение для  $p i_f$ , получаемое из (7), подставить в соотношение (6), записываемое для продольной оси. В результате приходим к системе из  $B$  уравнений вида

$$p I_{s(n)d}^p = \frac{1}{L_{s(n)}} \left[ U_{s(n)d}^p - R_s I_{s(n)d}^p + n\omega \Psi_{s(n)q}^p - \right. \\ \left. - \frac{M_{f(n)}}{L_f} (u_f - R_f i_f - \sum_{v=1}^{v(m)} M_{f(v)} p I_{s(v)d}^p) \right], \quad (10)$$

которые несложно решить аналитически при заданном значении  $m$ .

В частном случае – при обеспечении в САУ жесткой стабилизации тока обмотки возбуждения  $i_f$  – с учетом того, что для неявнополюсного СД левая часть уравнения (8) свертывается согласно соотношению

$$\bar{U}_{siv} = \frac{N}{m} \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} e^{jn\frac{\pi}{m}(1-i)} e^{jnx} \left[ K_{s(n)d} \operatorname{Re} \left( \bar{U}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(i-1)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times e^{-jnx} \right) + j K_{s(n)q} \operatorname{Im} \left( \bar{U}_{siv} e^{jn\frac{\pi}{m}(i-1)} e^{-jnx} \right) \right] = \\ = \bar{U}_{siv} \left( 1 - \frac{N}{m} \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} K_{s(n)} \right),$$

на основании (8) можно получить следующее компактное выражение для  $\bar{U}_{Siv}$ :

$$\bar{U}_{Siv} = \frac{1}{1 - \frac{N}{m} \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} K_{S(n)}} \left[ \sum_{n=v+NQ}^{n(m)} e^{jn\frac{\pi(1-i)}{m}} e^{jn\alpha} \left[ K_{S(n)} (\bar{U}_{(v)}^p - R_s \bar{I}_{S(v)}^p - jn\omega \bar{V}_{S(v)}^p) + jn\omega (\bar{V}_{S(n)}^p - L_{sl} \bar{I}_{S(n)}^p) \right] \right]$$

Анализ расчетных кривых электромагнитного момента (рис. 4), полученных на основе модельного эксперимента для 9-фазного СД с постоянными магнитами ( $P_H = 11$  кВт,  $U_H = 28$  В,  $f_H = 533$  Гц) при нагрузочном моменте на валу машины, равном номинальному ( $M_C = M_H$ ), и скорости вращения  $\omega = 0,1\omega_H$ , показывает, что в аномальном режиме работы (рис. 4,б) частота пульсаций электромагнитного момента 9-фазного СД соответствует частоте пульсаций 3-фазной машины. При этом амплитуда этих пульсаций возрастает более чем в 3 раза.

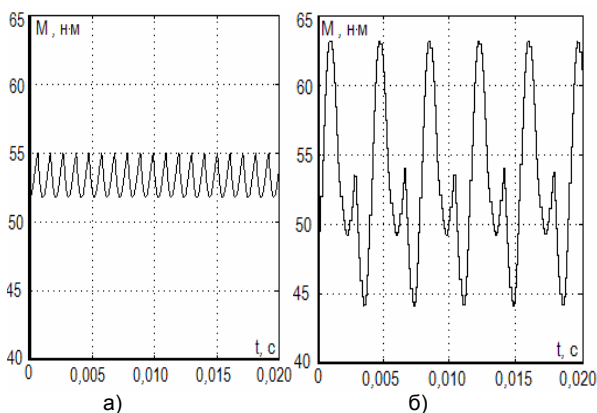


Рис. 4. Кривые электромагнитного момента: а – в режиме работы с полным числом фаз; б – при отключении одной 3-фазной системы (СД питается системой напряжений прямоугольно-ступенчатой формы, наиболее рациональной для m-фазных ( $m > 3$ ) двигателей)

Анализ кривых изменения относительных пульсаций электромагнитного момента СД при изменении числа фаз его статорной обмотки (рис. 5) показывает, что при видимом ухудшении регулировочных характеристик m-фазный СД в указанных аномальных режимах остается принципиально работоспособным. Следует отметить, что приведенные результаты соответствуют работе СД в разомкнутой системе. Как показывают исследования, при работе СД в замкнутой системе (например, с обратными связями по скорости и ортогональным составляющим тока  $\bar{I}_{S(1)}$ ) регулировочные характеристики машины в режимах работы с неполным числом фаз существенно улучшаются.

Голубев Александр Николаевич,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
 телефон (4932) 26-99-03,  
 e-mail: zav@toe.ispu.ru

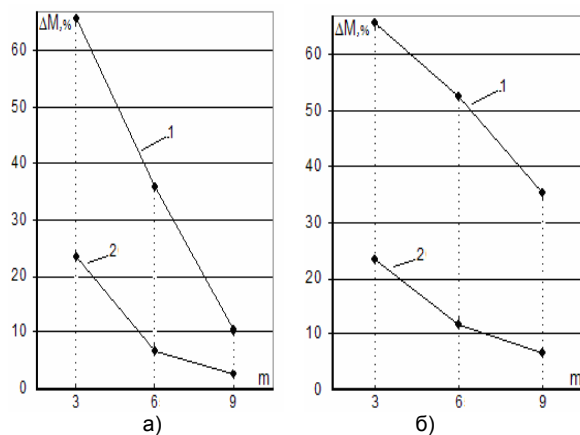


Рис. 5. Кривые изменения относительных пульсаций электромагнитного момента m-фазного СД: а – в режиме работы с полным числом фаз; б – при отключении ( $m = 6, 9$ ) одной 3-фазной системы; 1 –  $M_C = 0,1 M_H$  и  $\omega = 0,1 \omega_H$ ; 2 –  $M_C = 0,6 M_H$  и  $\omega = 0,1 \omega_H$

### Заключение

Принципиальная возможность работы m-фазного СД при выходе из строя некоторого числа фаз обуславливает повышение функциональной надежности всей электромеханической системы.

В связи с невозможностью использования для анализа режимов работы с неполным числом фаз математического описания m-фазного СД для симметричных режимов следует использовать подход к моделированию указанных аномальных режимов на основе охвата исходной модели положительной обратной связью по наводимым на обесточенных фазах ЭДС, для определения которых приведены аналитические соотношения без использования операции дифференцирования в явном виде.

Результаты моделирования показывают, что при аварийном обесточивании групп фаз статорной обмотки m-фазных ( $m > 3$ ) СД их регулировочные характеристики в отношении пульсаций электромагнитного момента становятся сопоставимыми с показателями 3-фазного СД.

### Список литературы

1. Бабаев М.Б., Голубев А.Н., Королев А.Н. Особенности применения многофазных асинхронных двигателей в регулируемом приводе // Электричество. – 1991. – № 11. – С. 57–71.
2. Голубев А.Н. Многофазный асинхронный электропривод при неполном числе фаз статорной обмотки и его моделирование // Электротехника. – 1996. – № 1. – С. 20–24.
3. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Многофазный асинхронный электропривод в аномальных режимах работы // Электротехника. – 2001. – № 10. – С. 17–22.
4. Савельев Б.А., Рипс Я.И. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. – М.: Энергия, 1974.
5. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.

Сайфульмулюков Фанур,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
телефон (4932) 26-99-03,  
e-mail: zav@toe.ispu.ru