

**В. Ф. Борисенко**, канд. техн. наук, доц., **В. А. Сидоров**, д-р. техн. наук, доц.  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия.  
Тел./Факс: +7 949-354-89-96; E-mail: [borissenko.vp@gmail.com](mailto:borissenko.vp@gmail.com)

## ОБОБЩЁННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТИПОВОЙ МНОГОСВЯЗНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Современный уровень развития аппаратных, цифровых, информационных, средств связи и измерений позволяет решать многие вопросы диагностирования технического состояния диагностирования ЭМС и выработки на их базе прогнозов долгосрочного (кратковременного) функционирования, а также сроков проведения ремонтных операций, их уровня и требуемого для этого уровня ремонтного оборудования.*

*На практике, в реальных условиях промышленного предприятия, задача технической оценки работоспособности конкретного объекта ставится в другой плоскости, исходя из оснащённости, например, завода средствами диагностирования, наличием высококвалифицированных специалистов, способных выполнить оценку состояния объекта и дать точные и жёсткие целеуказания на характер дальнейшего использования оборудования и режимов его работы, исходя из длительности эксплуатации оборудования, его ремонтпригодности, а также наличия резервного оборудования и степени его доступности.*

**Ключевые слова:** техническое состояние, электромеханическая система, диагностирование.

V. F. Borisenko, V. A. Sidorov

## A GENERALIZED APPROACH TO ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION A TYPICAL MULTICOMMUNICATED ELECTROMECHANICAL SYSTEM (EMC)

*The current level of development of hardware, digital, information, communication and measurement tools allows us to solve many issues of diagnosing the technical condition of EMC diagnostics and developing forecasts of long-term (short-term) functioning on their basis, as well as the timing of repair operations, their level and the required level of repair equipment.*

*In practice, in the real conditions of an industrial enterprise, the task of technical assessment of the operability of a particular object is set in another plane, based on the equipment, for example, of the plant with diagnostic tools, the presence of highly qualified specialists who are able to assess the condition of the object and give accurate and strict target indications for the nature of further use of equipment and its operating modes, based on the duration of operation of the equipment, its maintainability, as well as the availability of backup equipment and the degree of its availability.*

**Keywords:** technical condition, electromechanical system, diagnostics.

### 1. Введение

Вопросы связанные с оценкой технического состояния электромеханических систем приобретают в последнее время большую популярность в связи с повышением требований безотказности к электромеханическим системам (ЭМС) и обширными возможностями систем контроля и защиты. Возможные варианты решений весьма разнообразны. В работе [1], предлагается контроль технического состояния тяговых электрических машин проводить, используя математическое моделирование энергетических показателей. Отличие поведения разработанных моделей и практики эксплуатации с внезапными, внеплановыми режимами и действиями персонала вполне очевидно. Ранее [2], предлагалось объединить программную и аппаратную реализацию алгоритмов сбора и обработки текущих измерений, построения оценок состояния системы в реальном времени и разработать экспериментальную методику гарантированного оценивания состояния ЭМС с асинхронным двигателем в реальном времени.

Для шаровых мельниц наиболее часто отмечаются [3, 4] износ шаров и брони барабана, перегрев подшипников, вибрация, износ зубьев, налипание пыли на обмотку статора. Ранее была разработана методология [5], позволяющая оценить эксплуатационную надежность электрических машин с точки зрения системного анализа в виде «дерева цели». Для оценки технического состояния турбогенератора и силового трансформатора предложен расчет индекса технического состояния на основе весовых показателей функциональных узлов [6]. Вопросы многосвязного асинхронного электропривода с векторным управлением и нежесткой механикой стали объектом рассмотрения кандидатской диссертации [7]. В тоже время работа, объединяющая, все указанные подходы отсутствует, что и стало основной целью данной статьи.

## 2. Постановка проблемы

Большая часть электрооборудования, эксплуатируемого на предприятиях, получает питание от источников среднего напряжения. Для защиты источников и потребителей могут использоваться следующие виды защит: максимальная токовая ( $I >$ ); направленная токовая ( $I \leftarrow$ ); максимальная защита от токов нулевой последовательности ( $I_N >$ ); защита от максимальной обратной составляющей ( $I_i >$ ); тепловая защита ( $I_{\square}$ ); дифференциальная защита ( $\Delta I$ ); дифференциальная земляная защита ( $\Delta I_N$ ); защита от минимального напряжения ( $U <$ ); защита от максимальной и минимальной частоты ( $>f >$ ); защита от максимального напряжения ( $U >$ ); защита от обратной активной мощности ( $P \leftarrow$ ); защита от обратной реактивной мощности ( $Q \leftarrow$ ); защита от максимального напряжения нулевой последовательности ( $\circ/\square$ ); защита Бухгольца (Buchholz) ( $U_N >$ ).

## 3. Основной материал

Как мы видим, из перечня защит, ни одна из них не даёт прямого ответа на вопрос о техническом состоянии ЭМС, а лишь косвенно свидетельствуют о функционировании системы при условии, что контролируемые величины не превышают допустимых. Одной из основных задач защит является не допустить попадания персонала под возможные электрические и механические опасные ситуации. Чтобы защитить персонал и оборудование, защиты должны обладать быстроедействием, селективностью и надёжностью.

С другой стороны, при выборе защит часто идут на технико-экономический компромисс при выборе между безопасностью и наличием электропитания. Наиболее неблагоприятными ситуациями при эксплуатации электродвигателей являются: перегрузка (кратковременная или длительная), короткие замыкания, провалы напряжения, неравномерность напряжения по фазам, перегрев и др. С учётом того, что в промышленности подавляющее число приводных двигателей – это асинхронные двигатели (АД) мощностью до 100 кВт, то для них, кроме отмеченных выше неблагоприятных ситуаций, следует добавить межвитковые замыкания, одно, двух и трёхфазные короткие замыкания. Пусковые токи у АД с короткозамкнутым ротором лежат в пределах  $4 \dots 8 I_n$ , возможен перегрев роторов при затянувшемся пуске.

Очевидно, что вне режимов работы ЭМС, наличие различных видов защит, вопросы оценки её технического состояния (или диагностирования) стоят по уровню решаемых задач значительно выше. Можно привести в этом направлении простую схему, из которой видно значение и уровень системы диагностирования (рисунок 1).

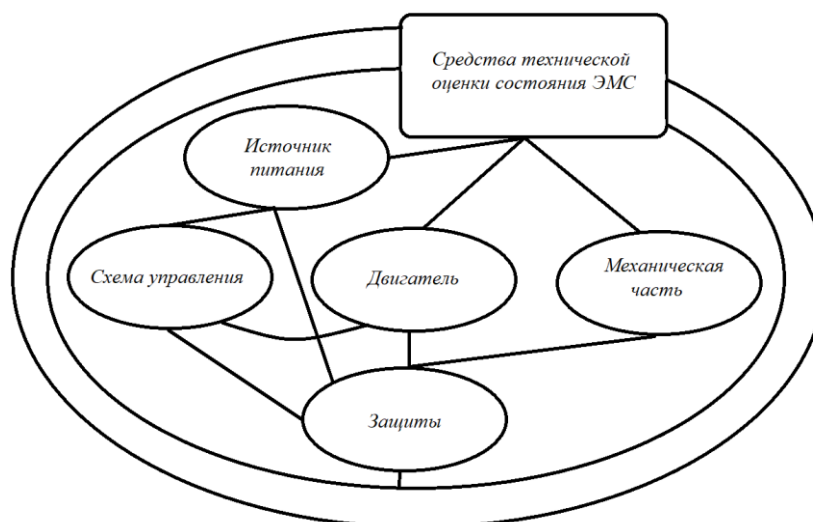


Рисунок 1. Иерархическая структура обобщённой ЭМС.

Такие структуры используются повсеместно для ЭМС, только оценка технического состояния (ТС) производится по одному показателю – отсутствие срабатывания защит, «зелёная индикация» на световом табло системы. Такая ситуация возможна даже при наличии развития неисправностей сразу в нескольких звеньях ЭМС. Если, увеличился шум редуктора, стало заметно биение муфты, появились продольные колебания ротора двигателя – в этом случае необходимо проведение вибродиагностического контроля (измерение составляющих вибрации, включая общий уровень, спектральный анализ, анализ временных реализаций и сравнение с допустимыми для данного класса механизмов).

Исходя из опыта эксплуатации ЭМС, можно привести типовые наборы защитных устройств в зависимости от мощности приводных двигателей, типа двигателя и характера его исполнения. Для машин малой мощности подключение к сети возможно с помощью рубильника, в силовой цепи устанавливаются плавкие предохранители, в схеме управления предусматривается нулевая защита. При использовании автоматического выключателя дополнительно имеем максимальную токовую (МТЗ) и тепловую защиту (ТЗ). Причём, для АД с короткозамкнутым ротором МТЗ не должна срабатывать в пусковых режимах двигателя.

В случае мощных машин и в зависимости от приводного механизма число защит может возрастать до пяти – шести. К их числу следует отнести, кроме МТЗ и ТЗ, защиту от минимального и максимального напряжений (МинНЗ, МакНЗ), защиту от минимальной и максимальной частоты (МинЧЗ, МакЧЗ), а также защиты от обратных активной и реактивной мощностей ( $P_{актобр}$ ,  $Q_{реактобр}$ ).

Число приводных двигателей для реальных промышленных механизмов может лежать в довольно широком диапазоне – от одного – двух до нескольких десятков. Такие механизмы, как поворот экскаватора-драглайна, в зависимости от ёмкости ковша и длины стрелы может содержать от четырёх до восьми мощных двигателей постоянного тока; привод наклона конвертора (для средней и большой ёмкости) использует от четырёх до шести двигателей постоянного или переменного тока. Отводящие рольганги широкополосных станков могут иметь 40...50 и более приводных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с питанием от преобразователей частоты. Примеры разветвлённой электромеханической системы могут иметь вид, показанный на рисунке 2.

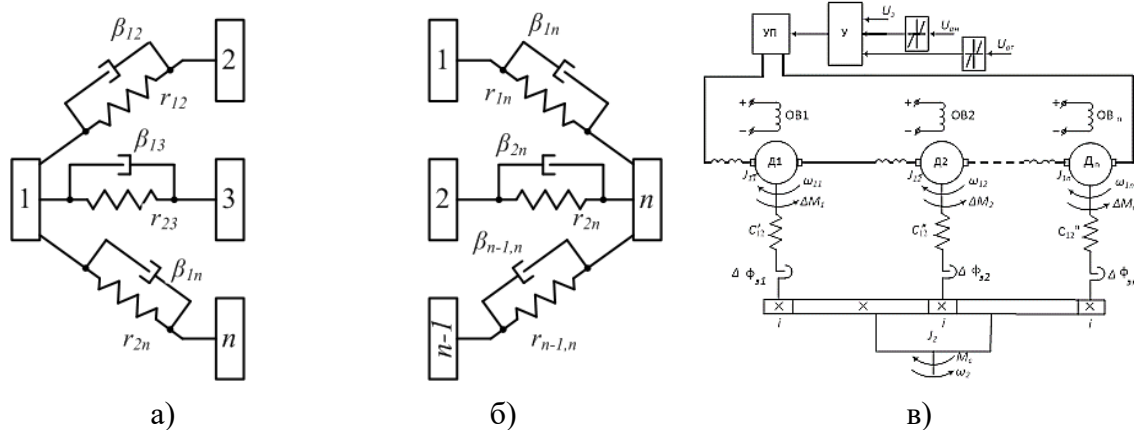


Рисунок 2. Типовые расчётные механические схемы: а) разветвление первого рода; б) разветвление второго рода; в) пример расчётной схемы механизма поворота экскаватора.

Приведенные схемы на рисунках 1 и 2 дополняют друг друга, но не дают представления об электромеханических процессах в системе. Выход ЭМС из строя объясняется ухудшением состояния электрических и механических звеньев – ухудшением состояния изоляции электродвигателей, перегревом отдельных звеньев (блоков) двигателя, износом подшипниковых узлов двигателя, редуктора и исполнительного механизма, накоплением усталостных деформаций (на уровне точки бифуркации) в промежуточных механических звеньях.

Техническая система имеет возможность полностью реализовать все функции в пределах заданных параметров только при работоспособном состоянии всех подсистем. Работоспособное состояние (РС) технической системы  $Q$ , состоящей из подсистем  $A, B, C$ , обеспечивается одновременным нахождением в работоспособном состоянии каждой из подсистем и работоспособным взаимодействием между ними. Некоторые из взаимодействий имеют приоритетное, некоторые второстепенное значение. Технологическая машина может быть определена как сложная система восстанавливаемых разноресурсных элементов, имеющих определённый уровень взаимодействия и находящихся под воздействием человеческого фактора, реализующего разрушительные или восстанавливающие действия.

Примером алгоритма для оценки технического состояния ЭМС может служить схема, приведенная на рисунке 3. В этой схеме выделены электрические и механические воздействия, а также последствия их взаимодействия и, как результат, переход к критериям состояния.

Одним из способов оценки технического состояния ЭМС является определение коэффициента ухудшения надёжности её составляющих. Если при вводе в эксплуатацию ЭМС коэффициент надёжности составлял, например,  $K_{над\Sigma} \approx 0,985$ , то по мере функционирования эта величина будет падать и может достичь значения  $K_{над\_крит}$ , при котором состояние объекта, которое может привести к отказу, травмам работающего персонала, значительному материальному ущербу или другим неприятным последствиям. Т.е. необходимо задаться значением  $K_{над\_крит}$ , при достижении которого система будет отключаться для проведения ремонтных операций. После реновации и проверки правильности функционирования система может быть вновь введена в работу. При последовательном

расположении подсистем *A, B*, Суммарный коэффициент надёжности определяется произведением:

$$K_{над\Sigma} \approx K_{надA} \cdot K_{надB} \cdot K_{надC} \cdot \dots \cdot K_{надi}, \tag{1}$$

где под  $K_{надA}$ ,  $K_{надB}$ ,  $K_{надC}$ ,  $K_{надi}$  понимаем надёжность источника питания, двигателя, промежуточных механических звеньев, исполнительного механизма, системы управления, наблюдателя состояния, средств контроля и защиты и др. Из этого многообразия элементов необходимо выбрать те, что в первую очередь повлияют на состояние системы и на возможность её отключения. К числу таких звеньев относим изоляцию двигателя, промежуточные механические звенья (валы, редукторы, подшипники), нагрузка на двигатель со стороны исполнительного механизм.

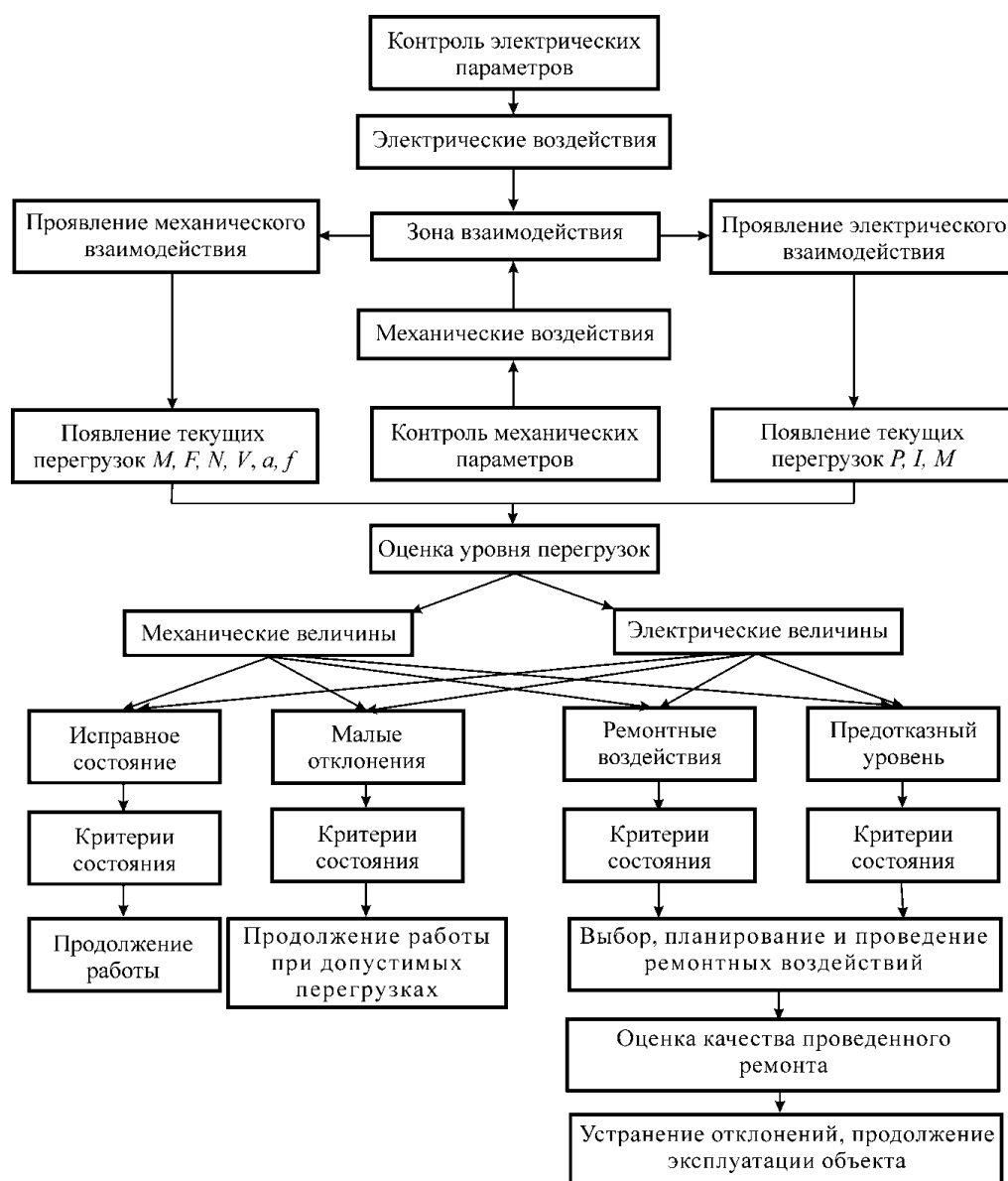


Рисунок 3. Алгоритм диагностирования технического состояния ЭМС

Первым звеном была отмечена изоляция. Для различных типов изоляции существуют время-нагрузочные кривые, из которых для различных режимов работы двигателя можно определить ресурс работы и перевести его в коэффициент снижения надёжности. Имея данные о потерях двигателя и режимах его работы, времени функционирования, оценивается состояние изоляции и её остаточный ресурс – откуда определяются коэффициент ухудшения состояния изоляции и её надёжности  $-\Delta K_{над\_изол.}$ .

Аналогично, на базе данных об упругих моментах ( $M_{упрi}$ ) и их близости к точке бифуркации находится коэффициент ухудшения надёжности механической системы (механизма)  $-\Delta K_{над\_мех.}$ . Основанием для этого может стать коэффициент динамичности, определяемый как отношение динамических текущих показателей системы к номинальным (расчетным). Например, при захвате слитка прокатной клетью, комбинированный редуктор привода испытывает дополнительные динамические нагрузки, которые проявляются во временной форме вибрационного сигнала (рисунок 4а) и в нагрузочных характеристиках двигателя (рисунок 4б). Следовательно:

$$\Delta K_{над\_мех.} = (K_{над\_мех\_тек.} - K_{над\_мех\_нач.}) / K_{над\_мех\_нач.}; \quad (2)$$

$$K_{над\_мех\_тек} = A_{дин} / A_{ном} \quad (3)$$

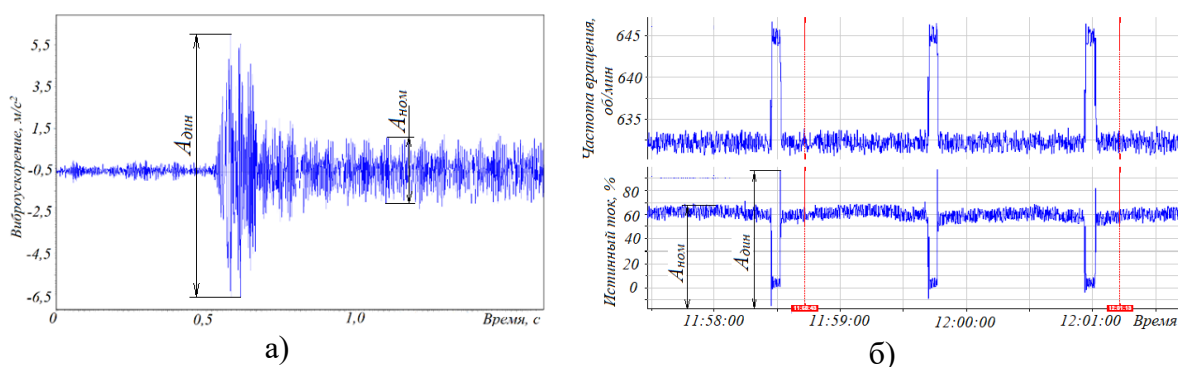


Рисунок 4. К оценке коэффициента ухудшения надёжности механической системы: а) сигнал виброускорения; б) ток и частота вращения двигателя.

Параллельно ведётся оценка вибрационных показателей в контрольных точках основных звеньев механической системы –  $V_{тек\_вibr} \leq V_{доп\_вibr}$  (мм/с),  $a_{тек\_вibr} \leq a_{доп\_вibr}$  (м/с<sup>2</sup>) – и переход к ухудшению надёжности системы по вибропоказателям  $-\Delta K_{над\_вibr.}$ . Далее  $\Delta K_{над\_изол.}$ ,  $\Delta K_{над\_мех.}$ ,  $\Delta K_{над\_вibr.}$  вводятся в блок определения суммарного коэффициента ухудшения состояния системы, после чего  $K_{над\_ухуд\_с}$  сравнивается с  $K_{над\_ухуд\_доп}$  для данного класса механизмов и систем. Результат сравнения – система может продолжать работу или подлежит остановке, реновации, проверке функционирования и возможному, в дальнейшем вводу в эксплуатацию. Вид схемы для оценки технического состояния ЭМС приведен на рисунок 5. Её можно несколько видоизменить, используя понятие допустимого коэффициента динамичности  $K_{динi\_доп}$ . Схема дополняется расчетным узлом, из которого значения упругих моментов ( $M_{упр}$ ) поступают в блок определения текущего  $K_{динi}$ , последний сравнивается с допустимым для него значением, рисунок 6.

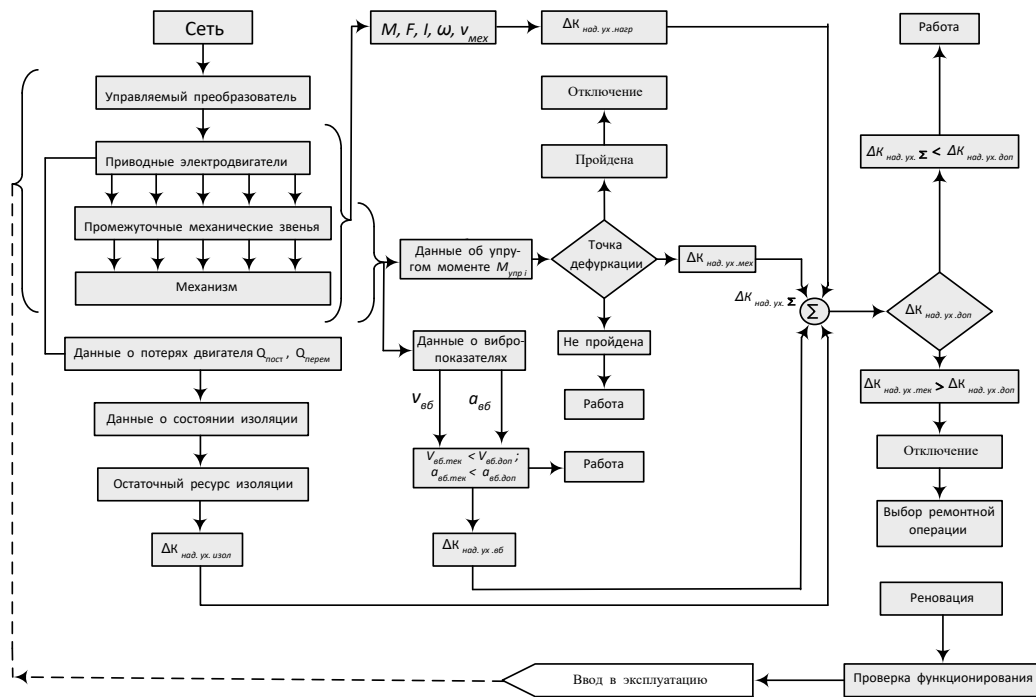


Рисунок 5. Алгоритм оценки текущего состояния ЭМС по величине  $\Delta K_{над.ух}$ .

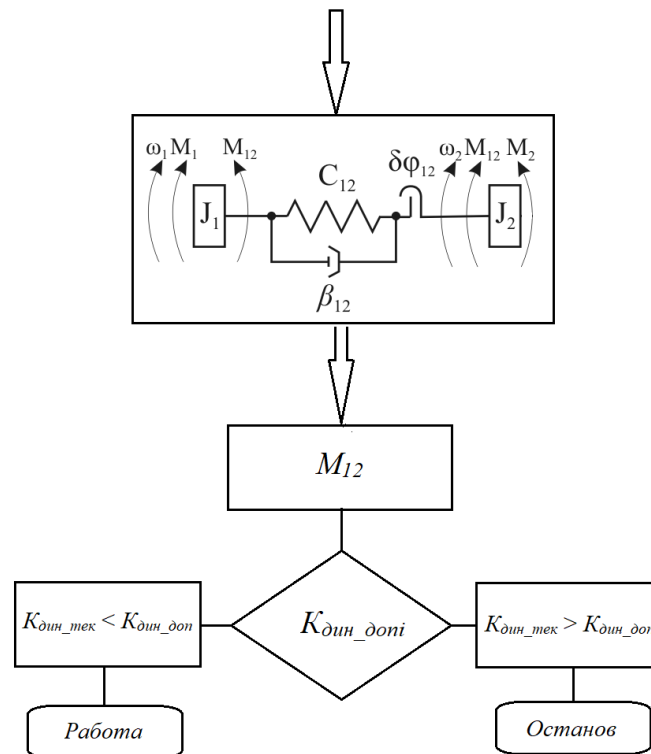


Рисунок 6. Узел оценки технического состояния ЭМС по величине  $K_{дин\_допi}$  для двухмассовой системы

Для создания диагностического комплекса необходимо, в первую очередь, иметь блок выделения текущих величин, к которым следует отнести токи якорей (статоров)  $I_1, I_2, \dots, I_n$ ; потери в двигателях (постоянные  $Q_{пост}$ , переменные  $Q_{перем}$ ), частоты вращения двигателей  $\omega_{\delta 1}, \omega_{\delta 2}, \dots, \omega_{\delta n}$  и углы их поворота  $-\varphi_{\delta 1}, \varphi_{\delta 2}, \dots, \varphi_{\delta n}$ ; частоты вращения узлов механизма –  $\omega_{M1}, \omega_{M2}, \dots, \omega_{Mn}$ ; данные о вибрации двигателей  $-V_{\delta 1}, V_{\delta 2}, \dots, V_{\delta n}, a_{\delta 1}, a_{\delta 2}, \dots, a_{\delta n}$ ; температуру двигателей  $-\tau_{\delta 1}, \tau_{\delta 2}, \dots, \tau_{\delta n}$ . При работе двигателей на линейных участках механических характеристик расчёт движущего момента не вызывает проблем  $-M \equiv I$ .

В случае многомассовой расчётной схемы необходимо определение угла закручивания вала:  $\Delta\varphi_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2$ ;  $\Delta\varphi_{2-3} = \varphi_2 - \varphi_3 \dots \Delta\varphi_{(n-1)-n} = \varphi_n - \varphi_{n+1}$ , а затем нахождение упругих моментов  $M_{упр1-2}, M_{упр2-3}, M_{упр(n-1)-n} = \varphi_n - \varphi_{n+1}$  ( $M_{упр} = c_{мех} \cdot \Delta\varphi$ ).

Контроль температуры двигателя (или её расчёт) возможен в случае упрощённой одно массовой тепловой модели –  $\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T})$ ,  $\tau_{нач} = 0$ . В случае нестационарного нагружения и тяжёлых условий работы двигателя необходимо прибегнуть к много массовой тепловой схеме замещения – число расчётных масс, обычно не превышает 5...7. В ряде случаев, по требованию заказчика, в двигателе устанавливаются датчики температуры и их данные передаются на мнемосхему или пульт оператора, а также вводятся в схему защит. Блок-схема, учитывающая отмеченное выше, приведена на рисунке 7, за исключением узлов подключения двигателей к управляемому преобразователю, подразумевается, что они находятся в блоке выделения текущих величин.

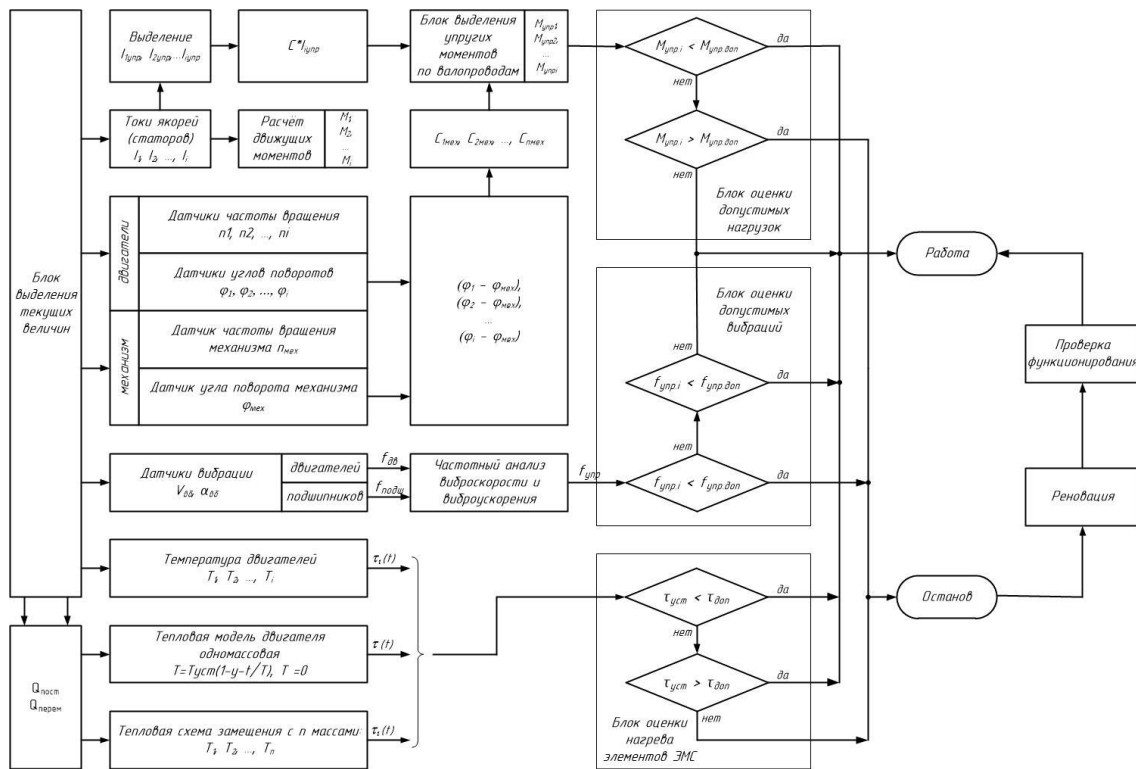


Рисунок 7. Блок-схема диагностического комплекса

Реализация предлагаемого диагностического комплекса в промышленности (а не в лабораторных условиях) возможна при наличии высококвалифицированного персонала, а также данных о конструктивных особенностях механической части (передаточные числа, материал валов, жёсткости, частоты вращения, типоразмеры подшипников, число зубьев и др.) и электродвигателя (постоянные нагрева и охлаждения для одно



массовой тепловой модели двигателя, данные о материалах и проводимости отдельных звеньев и узлов двигателя при составлении тепловой схемы замещения двигателя.

Контроль за вибрационными показателями реализуется по обычной программе – используются пьезоэлектрические датчики с магнитным креплением в одно- или много канальном исполнении в комплекте с анализатором вибрации и компьютерными программами для обработки вибрационного сигнала.

Примеры ЭМС при двух и более приводных электродвигателях постоянного тока с независимым возбуждением, при последовательном и параллельном соединении якорей ( типовые схемы для приводов механизмов поворота экскаваторов и наклона конвертеров), получающим питание от управляемых преобразователей, приведены на рисунке 8. При последовательном соединении якорей идёт автоматическое выравнивание нагрузки на двигатели (если  $r_{я1} \neq r_{я2}$ ), а при параллельном подключении якорей – привод обладает лучшими демпфирующими свойствами. Выбор схемы подключения зависит от мощности приводов, характера нагружения и режима работы ЭМС.

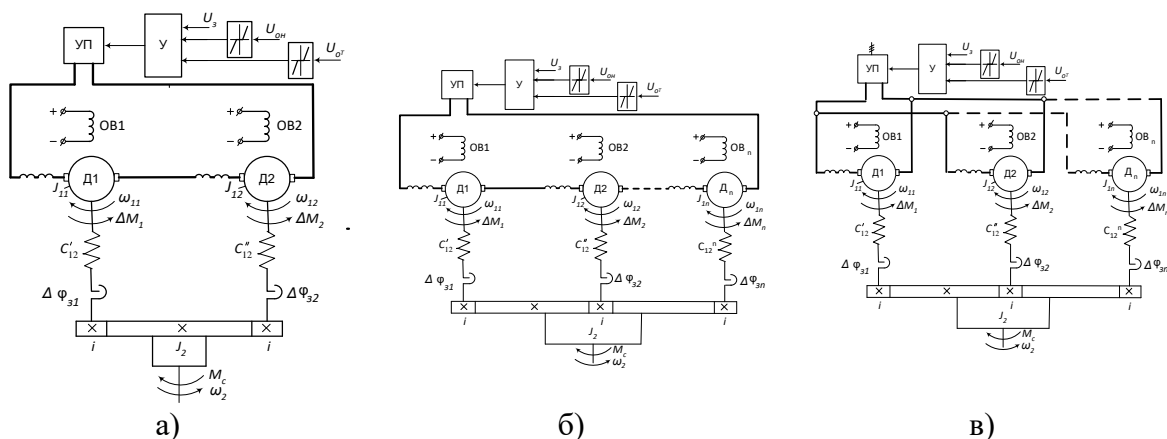


Рисунок 8. Электромеханические схемы для двух- и  $n$ -приводных электродвигателей при последовательном (а, б) и параллельном (в) соединениях якорей

Осциллограмма пуска 4-х двигательного привода механизма поворота экскаватора приведена на рисунке 9. Показательными являются колебания угловой частоты вращения двигателя на этапе интенсивного набора скорости, а также при переходе в режим замедления. Этим участкам соответствуют зоны колебаний упругого момента, причём, при активном наборе скорости  $M_{упр}$  имеет один знак, а при переходе в режим замедления – обратный.

На данной осциллограмме (рисунок 9) наблюдается образование зазоров в момент изменения знака ускорения (переход к замедлению). Очевидно, что на начальном этапе замедления колебания частоты вращения и упругого момента выше, чем на том же этапе пуска. Данные переходные этапы являются наиболее информативными при диагностике общего состояния ЭМС.

Термограммы, приведенные на рисунке 10 позволяют судить о тепловом состоянии двигателей и возможности дальнейшего функционирования машин. Термограммы 10а, 10б, дают возможность получить общее заключение о тепловом состоянии двигателя. Информация на термограммах 10в, 10г должна быть использована при планировании ремонтных и профилактических работ, что определяется степенью перегрева рядом расположенных деталей.

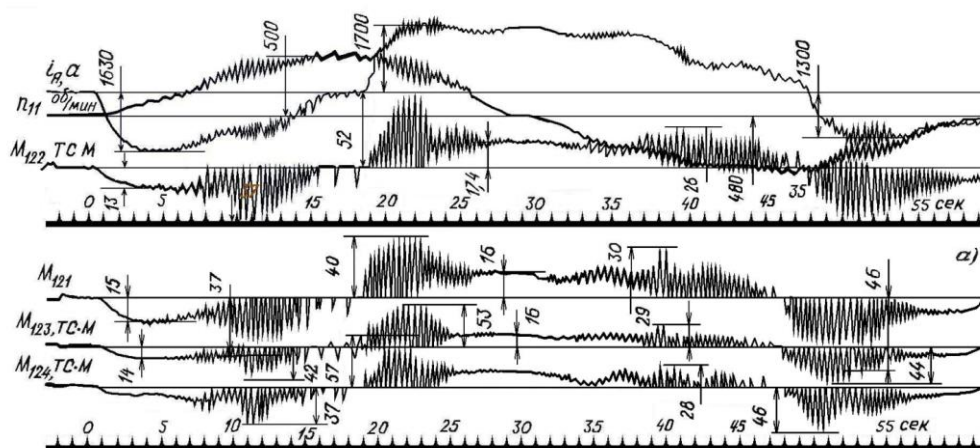


Рисунок 9. Пуск 4-х двигательного привода механизма поворота экскаватора

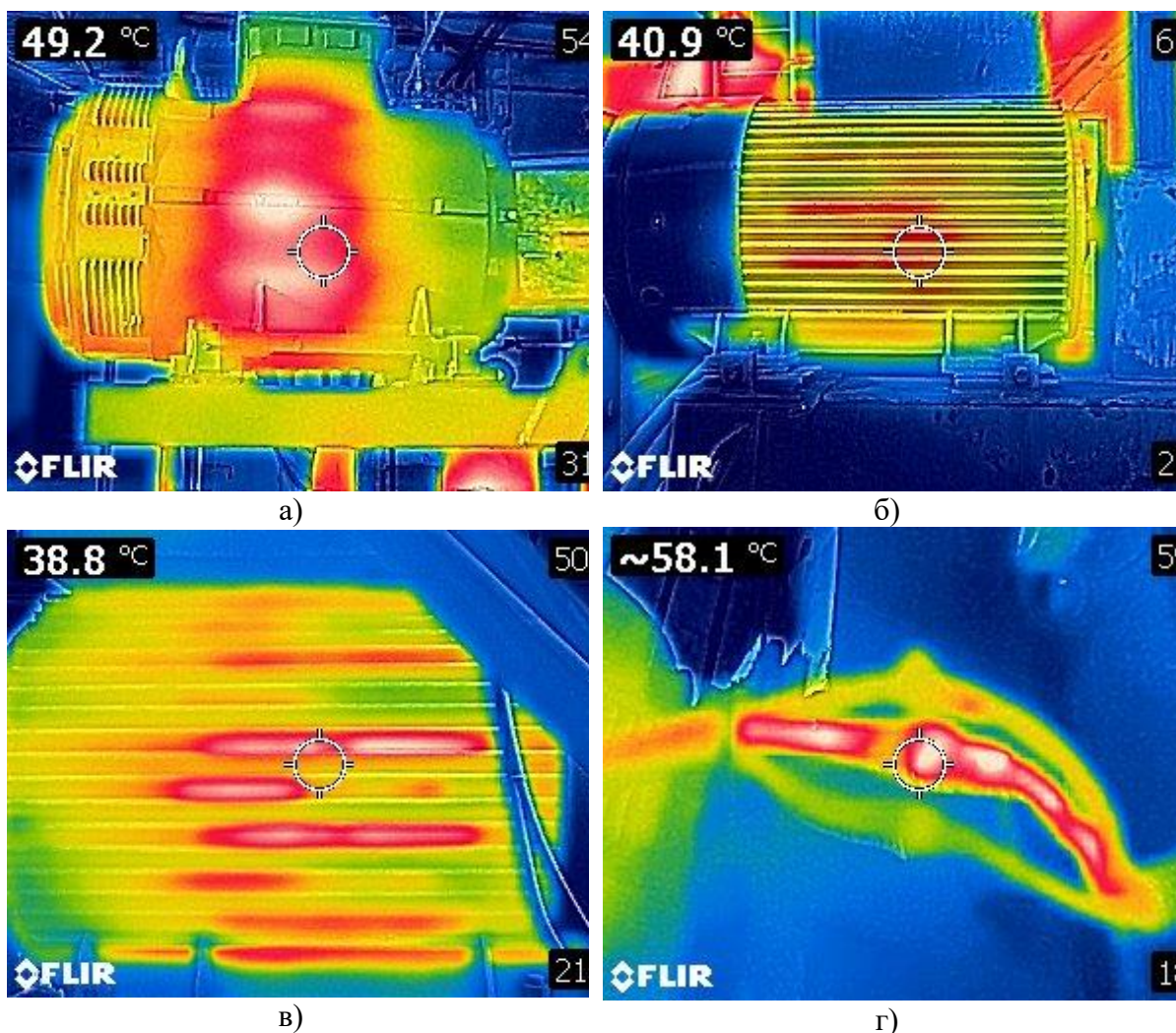


Рисунок 10. Тепловое изображение двигателя: а) нагрев статорных обмоток; б, в) местные перегревы статора; г) нагрев одной фазы питания

В части механической проявления повреждений ЭМС в целом соответствуют традиционным представлениям по вибрационному диагностированию: измерение общего уровня – среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц и среднеквадратичного и пикового значений виброускорения в частотном диапазоне 10...5000 Гц в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, анализ спектров виброскорости, виброускорения, огибающей и временной формы вибрационного сигнала и др.

#### 4. Заключение

1. Впервые предложен алгоритм оценки технического состояния сложной разветвленной много массовой электромеханической системы, учитывающий механическую и электрическую составляющие.

2. Предложен способ оценки технического состояния сложной ЭМС по величине ухудшения коэффициента надежности обобщенной системы, включая оценку его текущего коэффициента динамичности.

3. Дан вариант устройства контроля текущего состояния ЭМС и алгоритм его реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Менщиков И. А. Оценка технического состояния электромеханических систем с помощью энергетических показателей // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-elektromehnicheskikh-sistem-s-pomoschyu-energeticheskikh-pokazateley>.

2. Яфасов, Ф. И. Оценивание состояния и функциональное диагностирование электромеханической системы с асинхронным двигателем: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева. - Казань, 2005. - 18 с.

3. Бестужева, О. В. Прогнозирование остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы с учетом напряженно-деформированного состояния: автореферат дис. ... 05.02.13 / Бестужева Ольга Васильевна; [Место защиты:]. - Белгород, 2019. - 18 с.

4. Гамидов Ф. М. Определение оптимальных параметров конструкции подъемных лифтеров в шаровых мельницах типа SAG MILL // НАУ: сетевой научный журнал. 2020. № 51-1 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-v-sharovyih-melnits-tipa-sag-mill> (дата обращения: 29.07.2023).

5. Гусев В. В. Методологические предпосылки к оценке эксплуатационной надежности электрических машин // Известия ТПУ. 2008. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-predposylki-k-otsenke-ekspluatatsionnoy-nadezhnosti-elektricheskikh-mashin> (дата обращения: 26.04.2024).

6. Байдюк М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин. ЖУРНАЛ: ИЗВЕСТИЯ СПБГЭТУ ЛЭТИ. Номер: 3 Год: 2019 Страницы: 78-84

7. Гнездов, Н. Е. Многосвязный асинхронный электропривод с векторным управлением и нежесткой механикой: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Гнездов Николай Евгеньевич; [Место защиты: Иван. гос. энергет. ун-т]. - Иваново, 2009. - 18 с.

Поступила в редколлегию 07.02.2024