

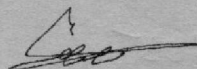
Авторефер.

X-45

Одесская государственная академия пищевых технологий

На правах рукописи

ХИЛАЛ МУСТАФА



**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕГРЕВА ПРИВОДНЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ  
НАГРУЗКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.13.07 - автоматизация технологических  
процессов и производств

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание научной степени  
кандидата технических наук

О д е с с а - 1996

СМ

Диссертация является рукописью.  
Работа выполнена в Одесской государственной академии пищевых технологий (ОГАПТ)

Научные руководители: доктор технических наук, академик  
ЖУКОВСКИЙ Эдуард Иосифович,  
кандидат технических наук,  
доцент ХОБИН Виктор Андреевич

017205  
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент ИА Украины  
КАРПОВСКИЙ Ефим Яковлевич,  
кандидат технических наук,  
профессор СОКОЛОВ Владимир Андреевич

ОДАХТ  
Бібліотека


Ведущая организация: Главное управление комбикормовой промышленности Министерства сельского хозяйства и продовольствия Украины (г. Киев)

Защита состоится "7" июня 1996 г. в "13" часов на заседании специализированного ученого совета К 05.16.02 при Одесской государственной академии пищевых технологий по адресу:  
270039, г.Одесса, ул. Канатная, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесской государственной академии пищевых технологий.

Автореферат разослан "6" мая 1996г.

Ученый секретарь специализированного  
ученого совета, к.т.н., доцент

 СЫЧУК Л.М.

ОНАХТ 24.05.12  
Прогнозирование пере



v017205

Актуальность работы. Повышение цен на энергоресурсы обусловило актуальность задачи энергосбережения. Один из путей ее решения - эксплуатация технологического оборудования в интенсивных режимах. Применительно к технологическому оборудованию с мощным электроприводом эти режимы, как правило, совпадают с предельно-допустимыми режимами эксплуатации приводных электродвигателей.

В зерноперерабатывающих отраслях промышленности таким оборудованием являются норрии, воздуходувки, пресса-экструдеры и грануляторы, дробилки. Мощность приводных электродвигателей этих машин составляет от 40 до 200 киловатт. По мере роста нагрузки на приводной электродвигатель повышается производительность машин и, одновременно снижаются удельные энергозатраты.

Рост нагрузки ограничен допусками на температурный режим работы электродвигателей. При его нарушении, средства аварийной температурной защиты двигателей, как правило тепловые реле, отключают двигатель от сети. Этим изоляция обмоток двигателя защищается от тепловой деградации и потери своих свойств, что означало бы выход из строя (т.е. аварию) двигателя. Чем ближе к предельно допустимому режим эксплуатации технологических машин, интенсивней возмущения и ниже качество САР стабилизирующей нагрузку, тем выше вероятность срабатывания тепловой защиты двигателя.

Аварийное отключение двигателя имеет ряд негативных последствий. 1. В аварийном режиме отключается все предшествующее оборудование. Оно оказывается "заваленным" продуктом, и для повторного запуска потребуется его очистка; ухудшается ритмичность производства, снижается его эффективность, ухудшаются условия труда. 2. На обмотках двигателя возникают большие (до 10-кратных) перенапряжения. Они вызывают микропробои изоляции и интенсивную деградацию изоляционных свойств. 3. Повторный запуск двигателя, так же усиливает деградацию изоляции обмоток из-за развития трещин и расслаивания

лака изоляции, чему способствуют большие электродинамические нагрузки на проводники обмоток и градиенты температуры между проводниками и их изоляций, вызываемые большими пусковыми токами. При неполной очистке рабочей зоны пуск двигателя будет затянутым, что усугубляет последствия. Все это резко снижает ресурс изоляции и, следовательно, двигателя в целом.

Цель работы. Разработать алгоритмы прогнозирования теплового состояния приводных электродвигателей для задач управления нагрузкой технологического оборудования, обеспечивающие их безаварийную эксплуатацию в энергосберегающих режимах.

Научная новизна работы определяется тем, что впервые получены и научно обоснованы:

- математические модели реле тепловой защиты и изменения тока нагрузки приводного электродвигателя, ориентированные на решение задач прогнозирования теплового режима приводных электродвигателей технологического оборудования с автоматическим регулированием нагрузки;

- методики и алгоритмы параметрической идентификации моделей;

- алгоритм прогнозирования перегрева приводных электродвигателей и упреждающего управления ими в предаварийных ситуациях;

- алгоритм коррекции заданного значения тока нагрузки приводных электродвигателей в соответствующих системах автоматического регулирования.

Практическая ценность работы определяется ее прикладной направленностью. Использование в промышленности научных результатов работы позволит снизить удельные энергозатраты для технологических машин и оборудования, нагрузка приводных электродвигателей которых регулируется расходом подаваемого продукта. Кроме того, предотвращение срабатывания реле тепловой защиты за счет прогнозирования теп-

лового состояния электродвигателей и реализации упреждающих алгоритмов управления в предаварийных режимах, исключает аварийные отключения этих электродвигателей при больших (больше номинальных) токах нагрузки и больших производительностях оборудования. Это предотвращает возникновение больших перенапряжений на обмотках двигателей и сокращение их ресурса работы, завалы продуктов предшествующего оборудования, необходимость его очистки для повторного запуска, и связанные с этим потери.

Результаты работы использованы при разработке систем непосредственно цифрового управления участками дробления и гранулирования, внедренной на Новополтавском комбинате хлебопродуктов Николаевской области.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях стран СНГ "Контроль и управление в технических системах", г. Винница, сентябрь, 1992 год и октябрь 1993 год; 54-й научной конференции ОТИПП им. М.В.Ломоносова, г. Одесса, апрель, 1994 год; Первой национальной научно-практической конференции "Хлебопродукты-94", Одесса, сентябрь, 1994 год; международной научно-практической конференции "Автоматизация биотехнических систем в условиях рыночной экономики и конверсии", Москва, октябрь, 1994.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 6 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и приложений. Изложена на 78 страницах, содержит 26 рисунков, 1 таблицу, список литературы включает 93 источника. Приложения включают в себя листинги программ, результаты исследований.

На защиту выносятся:

- математические модели реле тепловой защиты электродвигате-

лей, результаты их исследования и методика параметрической идентификации по паспортным токовременным характеристикам;

- математическая модель изменения тока нагрузки приводного электродвигателя над критическим уровнем и алгоритм ее текущей параметрической идентификации в реальном времени;

- алгоритм прогнозирования перегрева приводных электродвигателей и упреждающего управления ими в предаварийных ситуациях, использующий разработанные модели;

- алгоритм коррекции заданного значения тока нагрузки приводных электродвигателей в системах автоматического регулирования, обеспечивающий соблюдение теплового режима при различном характере нагрузки.

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов ОГАПТ и соответствует научному направлению "Создание и разработка нового эффективного оборудования, теории, методов его расчета и проектирования, автоматизация производственных процессов пищевых и зерноперерабатывающих производств". Материалы работы использовались при выполнении хозяйственной работы № ГР 0193U035077.

#### Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы, ее научная новизна и практическая ценность.

В первом разделе дан краткий обзор технологического оборудования с достаточно мощным электроприводом, использующегося в зерноперерабатывающей промышленности, важные особенности его эксплуатации и автоматизации.

Рассмотрены факторы, обуславливающие снижение надежности и экономичности асинхронных электродвигателей при их эксплуатации.

Проанализированы существующие системы температурной защиты асинхронных электродвигателей, их достоинства и недостатки, про-

блемы возникающие при решении задач прогнозирования перегрева двигателей.

Сформулированы задачи исследования диссертационной работы.

Во втором разделе решается задача разработки математической модели реле тепловой защиты (РТЗ) приводных электродвигателей (ПЭД). Ее структурная схема приведена на рис.1.

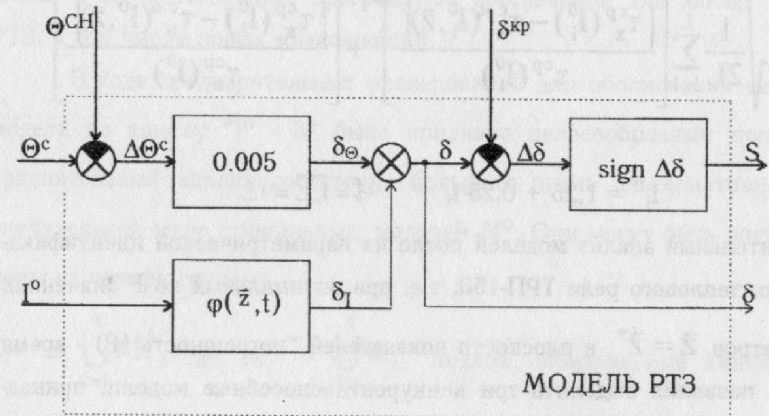


Рис. 1. Структурная схема модели РТЗ

Выходными переменными моделями РТЗ приняты условная степень прогиба биметаллической пластины  $\delta$  и ее состояние  $S$ :  $S=0$  при  $\delta - \delta_{кр} < 0$ ;  $S=1$  при  $\delta - \delta_{кр} \geq 0$ . На  $\delta$  влияют температура окружающей Среды и ток нагрузки ПЭД  $I$ , точнее кратность перегрузки двигателя по току  $I^o = I/I^H$ . По каналу " $\theta^c - \delta$ " для реально возможных диапазонов и частотных свойств входной переменной свойства модели могут быть приняты линейными безынерционными. Принятый коэффициент передачи канала соответствует известному электротехническому правилу: "Изменение  $\theta^c$  на  $10^\circ$  С соответствует изменению настройки (значение  $\delta_{кр}$ ) на 5%".

Где  $\tau_{x,n}^{cp}(I^0)$  - токовременные характеристики РТЗ, соответствующие исходным установившимся режимам защищаемого ПЭД: "х" - холостого хода, "н" - номинального;  $\tau_{x,n}^{cm}(I^0, \bar{Z})$  - то же, но для модели РТЗ с параметрами  $\bar{Z}$ :

$$F = \sqrt{\frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L \left[ \frac{\tau_x^{cp}(I_l^0) - \tau_x^{cm}(I_l^0, \bar{Z})}{\tau_x^{cp}(I_l^0)} \right]^2 + \left[ \frac{\tau_n^{cp}(I_l^0) - \tau_n^{cm}(I_l^0, \bar{Z})}{\tau_n^{cp}(I_l^0)} \right]^2}$$

$$I_l^0 = 1,25 + 0,25 \cdot l \quad l = \overline{1, L} = 11.$$

Сравнительный анализ моделей после их параметрической идентификации для теплового реле ТРП-150, т.е. при оптимальных по F значениях параметров  $\bar{Z} = \bar{Z}^*$ , в плоскости показателей "погрешность (F) - время счета" позволил выделить три конкурентноспособные модели, принадлежащих области компромиссов по Парето. В непрерывном времени  $t \in [0, \infty]$  модели имеют вид:

$$m_{11}: T_{11} \dot{\delta}_1(t) + \delta_1(t) = I^0(t), \quad z_{11}^* = T_{11}^* = 78,6с;$$

$$m_{21}: T_{21} \left[ 1 + a_{21} I^0(t) + b_{21} I^{02}(t) \right] \dot{\delta}_1(t) + \delta_1(t) = I^0(t),$$

$$\bar{z}_{21}^* = \{ T_{21}^* = 256с, a_{21}^* = 0,609, b_{21}^* = 0,356 \};$$

$$m_{41}: T_{41} \left[ 1 + a_{41} I^0(t) + b_{41} I^{02}(t) \right] \dot{\delta}_1(t) + \delta_1(t) = \left[ 1 - c_{41} \exp(-I^0(t) / d_{41}) \right] I^0(t),$$

$$\bar{z}_{41}^* = \{ T_{41}^* = 524с; a_{41}^* = 0,143; b_{41}^* = 1,10; c_{41}^* = -0,154; d_{41}^* = 28,7 \}$$

По каналу "I<sup>0</sup> - δ" необходимы динамические модели, свойства которых должны быть конкретизированы в ходе процедуры идентификации.

Важное требование, которое предъявлялось к процедуре идентификации - использование в качестве исходных данных паспортных токовременных ("времятоковых") характеристик РТЗ. Выполнение этого требования позволит использовать разработанные методики идентификации и соответствующее программное обеспечение для любых типов РТЗ, в том числе новых модификаций.

В ходе предварительных исследований для обоснования свойств модели по каналу "I<sup>0</sup> - δ" было признано целесообразным провести сравнительный анализ достаточно большого числа альтернативных, в значительной мере формальных, моделей M<sup>0</sup>. Они могут быть подразделены на четыре группы:

$$M^0 = \bigcup_{i=1}^4 M_i^0, \quad \text{где: } M_i^0 = \bigcup_{j=1}^5 m_{ij} \text{ модели, описываемые линейными}$$

дифференциальными уравнениями (ДУ);

$$M_2^0 = \bigcup_{j=1}^6 m_{2j} \text{ - модели, описываемые ДУ с нелинейной правой частью;}$$

$$M_3^0 = \bigcup_{j=1}^6 m_{3j} \text{ - модели, описываемые ДУ с нелинейной левой частью;}$$

$$M_4^0 = \bigcup_{j=1}^4 m_{4j} \text{ - модели, описываемые ДУ с нелинейными и правой и левой частями.}$$

Задача параметрической идентификации моделей формулировалась как оптимизационная:

$$\bar{z}^* = \arg \min F \left\{ \tau_x^{cp}(I^0), \tau_x^{cm}(I^0, \bar{Z}), \tau_n^{cp}(I^0), \tau_n^{cm}(I^0, \bar{Z}) \right\}, \bar{z} \in \bar{Z}^0$$

В дискретном времени  $t=nT_{\Pi}$ ,  $n=0, \infty$ , модели имеют вид:

$$m_{11}: \delta_1(nT_{\Pi}) = g_{111}I^0(nT_{\Pi}) + g_{112}\delta_1((n-1)T_{\Pi}),$$

где  $g_{111} = T_{\Pi}/(T_{11} + T_{\Pi})$ ;  $g_{112} = T_{11}/T_{\Pi}$ ;

$$m_{21}: \delta_1(nT_{\Pi}) = g_{211}I^0(nT_{\Pi}) + g_{212}\delta_1((n-1)T_{\Pi})$$

где:  $g_{211} = T_{\Pi}/(T_{21}g_{21} + T_{\Pi})$ ;  $g_{212} = T_{21}g_{21}/T_{\Pi}$ ;

$$g_{21} = 1/(1 + a_{21}I^0(nT_{\Pi}) + b_{21}(I^0(nT_{\Pi}))^2).$$

$$m_{41}: \delta_1(nT_{\Pi}) = g_{411}I^0(nT_{\Pi}) + g_{412}\delta_1((n-1)T_{\Pi}),$$

где:  $g_{411} = T_{\Pi}g_{41}/(T_{41}g_{410} + T_{\Pi})$ ;  $g_{412} = T_{41}g_{410}/T_{\Pi}$ ;

$$g_{410} = 1/(1 - a_{41}I^0(nT_{\Pi}) + b_{41}(I^0(nT_{\Pi}))^2);$$

$$g_{41} = 1 - c_{41}\exp(-I^0(nT_{\Pi})/d_{41}).$$

Фрагмент моделирования, иллюстрирующий "работу" модели  $m_{41}$  РТЗ ТРП-150 и токовременные характеристики РТЗ и его модели  $m_{41}$  приведены на рис. 2.

В третьем разделе разрабатываются вопросы прогнозирования срабатывания реле тепловой защиты для реализации упреждающих "мягких" алгоритмов защиты и коррекции заданного значения тока нагрузки ПЭД для обеспечения заданного теплового режима.

Обоснованный прогноз развития ситуации в предварийных или близких к ним режимах может позволить принять упреждающее решение о необходимости запуска алгоритма защиты электродвигателя. По

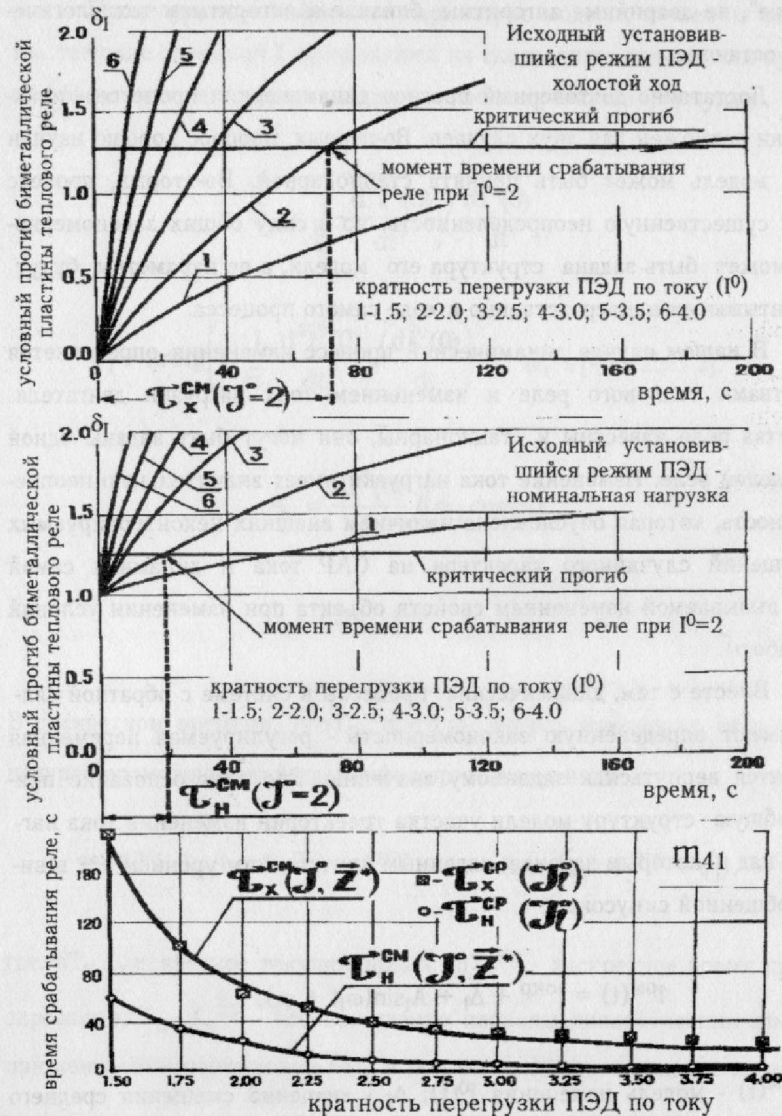


Рис.2. Переходные характеристики модели  $m_{41}$  РТЗ ТРП-150 при различных начальных условиях и их токовременные характеристики

сколькx защита реализуется с упреждением, то могут быть реализованы "мягкие", не аварийные алгоритмы, близкие к алгоритмам технологического останова.

Достаточно достоверный прогноз динамических процессов, практически возможен для двух случаев. Во-первых, процесс хорошо изучен и его модель может быть принята стационарной. Во-вторых, процесс имеет существенную неопределенность, но в силу общих закономерностей может быть задана структура его модели, а ее параметры будут рассчитываться непосредственно в ходе самого процесса.

В нашем случае динамический процесс изменения определяется свойствами теплового реле и изменением тока нагрузки двигателя. Свойства реле известны и стационарны, они могут быть заданы одной из моделей реле. Изменение тока нагрузки имеет значительную неопределенность, которая обусловлена наличием внешних неконтролируемых возмущений случайного характера на САР тока и динамики самой САР, вызываемой изменением свойств объекта при изменении условий его работы.

Вместе с тем, динамические процессы в системе с обратной связью имеют определенную закономерность - регулируемая переменная стремится вернуться к заданному значению. Это дает основание принять общую структуру модели участка траектории изменения тока нагрузки над некоторым заранее заданным критическим уровнем  $I^{окр}$  в виде обобщенной синусоиды:

$$I^{ом}(t) = I^{окр} + \Delta_1 + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1),$$

где  $I^{ом}(t)$  - модель изменения  $I^0(t)$ ;  $\Delta_1$  - значение смещения среднего значения функции, описывающей участок траектории  $I^{ом}(t)$  относительно  $I^{окр}$ ;  $A_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varphi_1$  - соответственно амплитуда, частота и фаза описываю-

щей функции.

Процедура идентификации параметров модели, точнее их оценок, т.к. текущие значения  $I$  осредняются на скользящих интервалах времени (фильтруются), сводится к расчету по полученным формулам:

$$\hat{\omega}_1 = \sqrt{-\frac{d^3 \hat{I}^0(t)}{dt^3} / \frac{d \hat{I}^0(t)}{dt}},$$

$$\hat{\varphi}_1 = \arctg\left(-\frac{1}{\hat{\omega}_1} \frac{d^2 \hat{I}^0(t)}{dt^2} / \frac{d \hat{I}^0(t)}{dt}\right), \quad \hat{\varphi}_1 \in [-\pi/2; \pi/2].$$

$$\hat{A}_1 = \frac{d \hat{I}^0(t)}{dt} / \left(\hat{\omega}_1 \cos \hat{\varphi}_1\right),$$

$$\hat{\Delta}_1 = \hat{I}^0(t) - I^{окр} - \hat{A}_1 \sin \hat{\varphi}_1.$$

В дискретном времени,  $t = nT_{\Pi}$ ,  $n = \overline{0, \infty}$ , модель изменения тока и процедура параметрической идентификации имеют вид:

$$I^{ом}(nT_{\Pi} + mT_{\Pi}^{пр}) = I^{окр} + \Delta_1 + A_1 \sin(\omega_1 mT_{\Pi}^{пр} + \varphi_1),$$

где:  $nT_{\Pi}$  - дискретное текущее время;  $mT_{\Pi}^{пр}$  - дискретное время прогнозирования;  $T_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}^{пр}$  - соответственно периоды дискретизации времени при измерении переменной  $I^0(t)$  и при ее прогнозировании по модели,

$$\hat{\omega}_1 = \frac{1}{T_{\Pi}} \sqrt{\frac{\hat{I}^0(0T_{\Pi}) - 3\hat{I}^0(-1T_{\Pi}) + 3\hat{I}^0(-2T_{\Pi}) - \hat{I}^0(-3T_{\Pi})}{\hat{I}^0(0T_{\Pi}) - \hat{I}^0(-1T_{\Pi})}};$$

$$\hat{\phi}_1 = -\arctg\left(\frac{1}{T_n \hat{\omega}_1} \frac{\hat{I}^0(0T_n) - 2\hat{I}^0(-1T_n) + \hat{I}^0(-2T_n)}{\hat{I}^0(0T_n) - \hat{I}^0(-1T_n)}\right);$$

$$\hat{A}_1 = \frac{\hat{I}^0(0T_n) - \hat{I}^0(-1T_n)}{T_n \hat{\omega}_1 \cos \hat{\phi}_1};$$

$$\hat{\Delta}_1 = \hat{I}^0(0T_n) - I^{окр} - \hat{A}_1 \sin \hat{\phi}_1,$$

где  $\hat{I}^0(0T_n), \hat{I}^0(-1T_n), \hat{I}^0(-2T_n), \hat{I}^0(-3T_n)$  - соответственно значения оценок  $I^0$  в текущий момент времени и моменты времени, смещенные относительно текущего на один, два и три периода дискретизации  $T_n$  назад.

Интервал времени  $\tau_{пр} = MT_n^{пр} (M = m^{max})$ , на глубину которого целесообразно прогнозировать изменение  $I^0$  и  $\delta$  можно найти из следующих соображений. Очевидно, что перегрев ПЭД возможен только на интервале времени, когда  $I^0 \geq I^{окр}$ . В этом случае значение интервала прогнозирования  $\tau_{пр}$  для очередного шага  $m$  решения модели  $I^{ом}(mT_n^{пр})$  будет определяться как значение отрезка времени от текущего момента до момента, когда переменная  $I^{ом}$  пересечет уровень  $I^{окр}$ , имея в точке пересечения отрицательную производную:

$$\tau_{пр} = \begin{cases} \frac{1}{\hat{\omega}_1} \left[ \pi - \arcsin\left(\frac{-\hat{\Delta}_1}{\hat{A}_1}\right) - \hat{\phi}_1 \right], \text{ при } \left| \frac{\hat{\Delta}_1}{\hat{A}_1} \right| \leq 1, \hat{\Delta}_1 < 0 \\ 2 \dots 3\tau_a, \text{ при } \left| \frac{\hat{\Delta}_1}{\hat{A}_1} \right| > 1, \hat{\Delta}_1 > 0, \\ 0, \text{ при } \left| \frac{\hat{\Delta}_1}{\hat{A}_1} \right| > 1, \hat{\Delta}_1 < 0 \end{cases}$$

где  $\tau_a$  - время, необходимое для реализации "мягкого" алгоритма защиты.

Величина шага моделирования при прогнозировании должна, с одной стороны обеспечивать необходимую точность расчетов, с другой - занимать для них минимальное время. Известно, что относительная погрешность расчета центрированной синусоиды при двадцати участках разбиения ее периода не превышает 1%. Как правило, моделирование будет вестись на интервале  $\tau_{пр}$ , который меньше периода синусоидальной составляющей модели. Исключение может составить ситуация, когда  $|\Delta_1/A_1| > 1, \Delta_1 > 1$ . Однако, в этом случае, при значительной постоянной составляющей абсолютная погрешность расчета будет меньше, чем для центрированной синусоиды, причем тем меньше, чем больше соотношение  $|\Delta_1/A_1|$ .

Учитывая сделанные замечания и удобство реализации алгоритма соотношение интервала прогнозирования к шагу моделирования принято постоянным и равным 20, т.е.  $\tau_{пр}/T_n^{пр} = 20$ . Откуда:  $T_n^{пр} = \tau_{пр}/20, M = 20, m = \overline{1, 20}$ .

Алгоритм прогнозирования работы тепловой защиты ПЭД включается как составная часть алгоритма управления технологическим агрегатом. Алгоритм включает в себя:

1 - обновление стековой памяти, где содержатся текущее  $I(nT_n)$  и три предыдущих  $I((n-1)T_n), I((n-2)T_n), I((n-3)T_n)$  значения тока нагрузки ПЭД, измеренные с шагом  $T_n$ ;

2 - расчет по выбранной из  $M_1^0$  модели  $m_{ij}$  РТЗ текущего значения  $\delta_1(nT_n)$ ;

3 - сравнение значения  $\delta_1(nT_n)$  с критическим, и в случае "ДА", когда  $\delta_1(nT_n) \geq \delta_1^{кр}$  передача управления ТА "жесткому" алгоритму за-

щиты; в случае "НЕТ":

4 - расчет параметров модели  $I^{OM}(nT_{\Pi})$ :  $\hat{\omega}_I, \hat{\Phi}_I, \hat{A}_I, \hat{\Delta}_I$ ;

5 - если в процессе вычисления  $\hat{\omega}_I$  подкоренное выражение оказывается отрицательным, то это означает, что для набора I, записанных в стек на момент  $nT_{\Pi}$  модель  $I^{OM}$  некорректна; в этом случае алгоритм прогнозирования не реализуется и осуществляется переход в оставшуюся часть алгоритма управления; в случае "НЕТ" переход к 6;

6 - расчет интервала прогнозирования  $\tau_{\text{пр}}$ , расчет шага прогнозирования  $T_{\Pi}^{\text{пр}}$ , присвоение номеру шага прогнозирования  $m$  начального значения  $m=1$ ;

7 - расчет прогнозируемого значения тока по его модели для шага прогнозирования  $m$ ;

8 - расчет прогнозируемого значения  $\delta_I$  для выбранной модели РТЗ  $m_{ij}$ ;

9 - сравнение прогнозируемого значения  $\delta_I$  с критическим  $\delta_I^{\text{кр}}$ ; в случае "ДА" к 12, в случае "НЕТ" - к 10;

10 - проверка номера  $m$  на максимальное значение  $M$ ; причем если  $m=M$ , т.е. "ДА", то прекращение работы алгоритма прогнозирования и переход в оставшуюся часть алгоритма управления, если нет, то к 11;

11 - увеличение номера  $m$  на единицу и возврат к 7;

12 - расчет оценки времени  $\hat{\tau}_{\text{пр}}^s$  от текущего момента до возникновения аварийной ситуации;

13,14 - сравнение  $\hat{\tau}_{\text{пр}}^s$  с временем, необходимым для реализации "мягкого" алгоритма ликвидации аварийной ситуации и переход по результатам сравнения в "мягкий" или "жесткий" алгоритм.

Блок-схема алгоритма прогнозирования представлена на рис. 3.

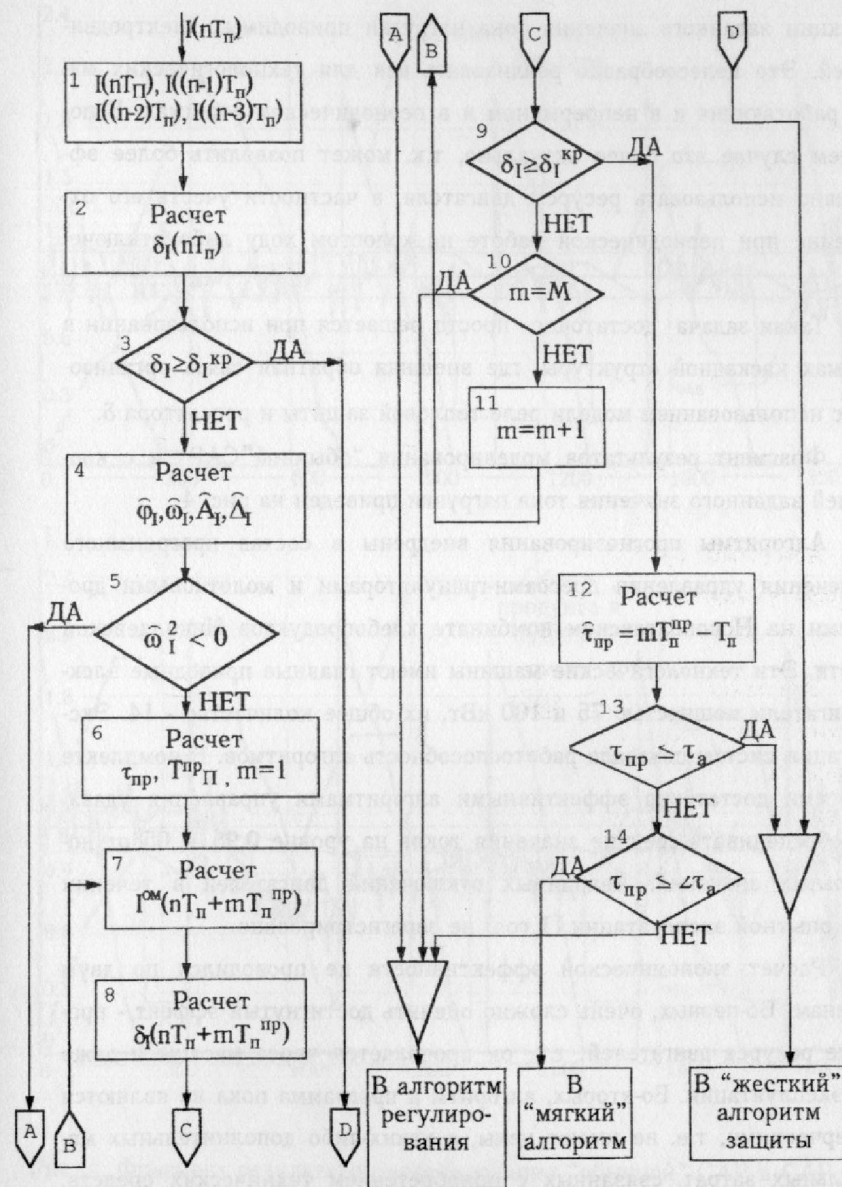


Рис. 3. Блок-схема алгоритма прогнозирования срабатывания РТЗ

Модели реле тепловой защиты позволяют использовать их для коррекции заданного значения тока нагрузки приводимых электродвигателей. Это целесообразно реализовать как для технологических машин, работающих и в непрерывном и в периодическом режимах. В последнем случае это более актуально, т.к. может позволить более эффективно использовать ресурсы двигателя, в частности учесть его охлаждение при периодической работе на холостом ходу либо отключении.

Такая задача достаточно просто решается при использовании в системах каскадной структуры, где внешняя обратная связь организована с использованием модели реле тепловой защиты и регулятора  $\delta$ .

Фрагмент результатов моделирования "обычной" САР и с коррекцией заданного значения тока нагрузки приведен на рис. 4.

Алгоритмы прогнозирования внедрены в состав программного обеспечения управления прессами-грануляторами и молотковыми дробилками на Новополтавском комбинате хлебопродуктов Николаевской области. Эти технологические машины имеют главные приводные электродвигатели мощностью 75 и 100 кВт, их общее количество - 14. Эксплуатация систем показала работоспособность алгоритмов. В комплекте с другими достаточно эффективными алгоритмами управления удалось обеспечивать средние значения токов на уровне 0,95...1,05 от номинальных значений. Аварийных отключений двигателей в течении срока опытной эксплуатации (1 год) не зарегистрировано.

Расчет экономической эффективности не проводился по двум причинам. Во-первых, очень сложно оценить достигнутый эффект - продление ресурса двигателей, т.к. он проявляется через месяцы и даже годы эксплуатации. Во-вторых, алгоритм и программа пока не являются коммерческими, т.е. не имеют цены, а каких-либо дополнительных материальных затрат, связанных с приобретением технических средств, выполнением монтажно-наладочных работ, не требовалось.

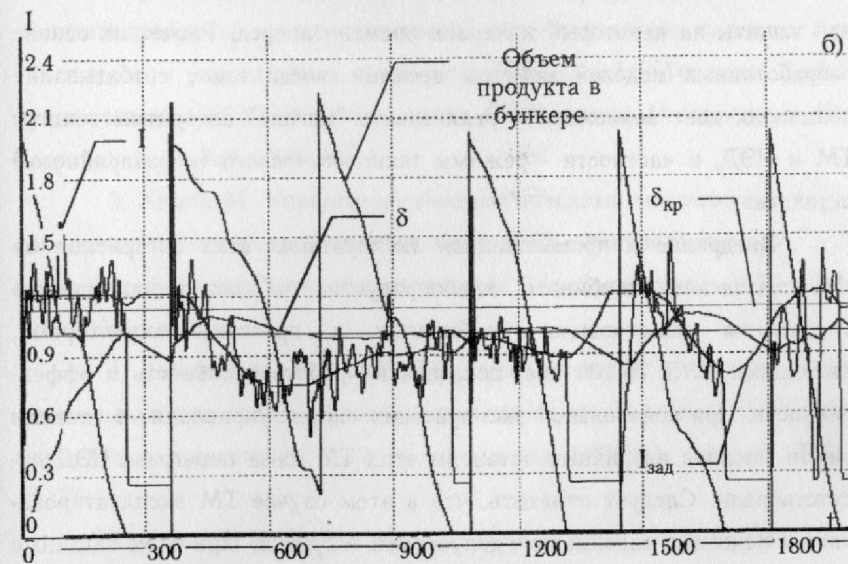


Рис. 4. Фрагмент результатов моделирования "обычной" САР и САР с коррекцией заданного значения тока

1. Полученные модели тепловой защиты приводных электродвигателей технологических машин могут быть использованы в задачах управления этими машинами для повышения надежности и эффективности их работы.

2. Наиболее очевидно использование моделей в задачах повышения эффективности тепловой защиты ПЭД и в задачах повышения эффективности и надежности эксплуатации ТМ при регулировании нагрузки ПЭД. Возможны и другие более специфические задачи, где можно использовать полученные модели, например, задачи определения вероятности срабатывания тепловой защиты ПЭД.

3. Повышение эффективности тепловой защиты ПЭД достигается за счет возможности прогнозирования факта срабатывания реле тепловой защиты на некоторый интервал времени вперед. Расчет на основе разработанных моделей момента времени, когда такое срабатывание возможно, дает возможность реализовать "мягкие" алгоритмы защиты ТМ и ПЭД, в частности - режимы технологического (не аварийного!) останова.

Внедрение и промышленная эксплуатация этих алгоритмов на Новополтавском комбинате хлебопродуктов в составе алгоритмов управления молотковыми дробилками и прессами-грануляторами, имеющими ПЭД 75-100 кВА, показала их работоспособность и эффективность. При контрольной эксплуатации систем управления в течении шести месяцев аварийные остановы этих ТМ из-за перегрева ПЭД отсутствовали. Следует отметить, что в этом случае ТМ эксплуатировались в режимах максимально-допустимой нагрузки. При этом заданные значения токов нагрузки ПЭД составляли  $(0,95...1,05) I^H$ , что существенно выше, чем до внедрения.

4. Повышение эффективности и надежности эксплуатации ТМ и их ПЭД достигается за счет возможности оценки с помощью модели те-

кущего теплового режима ПЭД и коррекции на основе полученной информации заданного значения рабочего тока нагрузки. Это позволяет максимально использовать ресурсы ПЭД, соблюдая при этом тепловой режим.

5. Рассмотренные задачи не являются альтернативными. Они могут использоваться совместно, взаимно дополняя друг друга.

Основные результаты диссертации опубликовано в работах

1. Хобин В.А., Хилал М. Прогнозирование перегрева приводных электродвигателей в задачах управления нагрузкой технологического оборудования. - В кн. "Контроль и управление в технических системах" // Тез. докл. н.-техн. конф. стран СНГ. - Винница: 1992. - с. 243.

2. Хобин В.А., Хилал М. Вероятностная модель работы тепловой защиты приводных электродвигателей технологических машин. - В кн. "Контроль и управление в технических системах" // Тез. докл. 2-ой научно-технической конференции стран Содружества Независимых Государств. - Винница: 1993. - с. 1.

3. Хилал М. Управление технологическими машинами с прогнозированием теплового состояния приводных электродвигателей // Тез. докл. I национальной научно-практ. конф. "Хлебопродукты - 94". - Одесса: 1994. - с. 189.

4. Хобин В.А., Хилал М. Текущая параметрическая идентификация модели для прогнозирования изменения тока нагрузки ПЭД технологических агрегатов // Тез. докл. научн. конф. ОТИПП. - Одесса: 1994. - с. 76.

5. Хобин В.А., Хилал М., Юнис Абдалла М. Энергосберегающее управление технологическими агрегатами с мощным электроприводом. - В кн.: "Автоматизация биотехнических систем в условиях рыночной экономики и конверсий" // Тез. докл. межд. н.-т. конф. - М.: 1994. - с. 22.

6. Выполнить комплекс работ по разработке и внедрению трех

