

УДК 621.313.3 : 621.316.9

**М. Ю. Шабовта**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

*Предложена методика определения параметров срабатывания защиты минимального напряжения синхронных электродвигателей, основанная на анализе изменения параметров переходного процесса, возникающего при провалах напряжения. Методика позволяет обеспечить защиту двигателя от пиков тока и электромагнитного момента, превышающих допустимые значения, а также в полной мере использовать запас динамической устойчивости машины.*

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель, защита минимального напряжения, электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

**M. U. Shabovta**

### **DETERMINATION OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS MINIMUM VOLTAGE PROTECTION WEARING PARAMETERS**

*The method of minimum voltage protection wearing-out parameters of synchronous motors determination is offered, based on the analysis of transient parameters change, arising up at the failures of voltage, which allows to provide protecting of engine from the peaks of current and electromagnetic moment, exceeding legitimate values, and also to a full degree to use the supply of dynamic stability of machine.*

**Keywords:** synchronous electric motor, minimum voltage protection, electromagnetic and electromechanics transients.

**М. Ю. Шабовта**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТУ МІНІМАЛЬНОЇ НАПРУГИ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

*Запропоновано методику визначення параметрів спрацьовування захисту мінімальної напруги синхронних електродвигунів, засновану на аналізі зміни параметрів перехідного процесу, що виникає при провалах напруги. Методика дає змогу забезпечити захист двигуна від піків струму і електромагнітного моменту, що перевищують допустимі значення, а також повною мірою використовувати запас динамічної стійкості машини.*

**Ключові слова:** синхронний електродвигун, захист мінімальної напруги, електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси.

Кратковременные нарушения электропитания (КНЭ) со стороны питающей сети являются серьёзной помехой для устойчивой работы высоковольтных синхронных двигателей (СД), которые, как правило, являются приводом ответственных агрегатов ряда производств химической, нефтяной и других отраслей промышленности. Согласно статистическим данным частота таких нарушений по основным источникам питания доходит до 10-12 раз в год [1]. При КНЭ существует вероятность восстановления напряжения источника в противофазе с вектором ЭДС СД, возникающие при этом токи создают большие динамические усилия и большие крутящие моменты на валу, что может привести к нарушению изоляции лобовых частей обмоток, а также поломке механической части двигателя и приводимого им механизма.

Из-за опасности повреждений оборудования часто встречаются случаи отключения

СД защитой минимального напряжения (ЗМН), параметры срабатывания которой необоснованно завышены. При отсутствии самозапуска отключение электродвигателя ответственного агрегата приводит к остановке технологического процесса и значительным материальным убыткам.

В известных источниках литературы по защите синхронных двигателей выбор параметров срабатывания ЗМН сводится к применению типовых значений, что позволяет утверждать об отсутствии методики определения уставок ЗМН, которая бы обеспечила защиту двигателя от появления в нём недопустимых пиков тока и электромагнитного момента, а также перехода СД в асинхронный режим с подключённым возбудителем.

Согласно действующим техническим условиям [2] на вращающиеся электрические машины последние должны выдерживать действие пиков тока и электромагнитного момента, возникающие при внезапном трёхфазном

коротком замыкании (КЗ) на выводах статора. Поэтому пики тока статора и электромагнитного момента, полученные при КЗ на выводах двигателя, можно считать допустимыми.

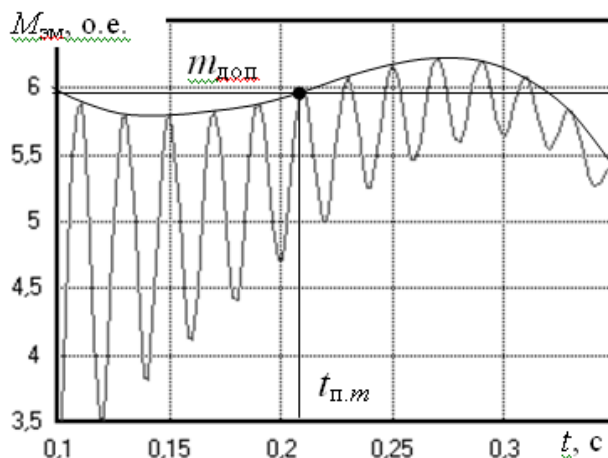
После глубокого провала напряжения, вызванного близким внешним КЗ, быстрое восстановление питания СД, в результате отключения этого повреждения соответствующей защитой, может привести к появлению в двигателе пиков тока статора и электромагнитного момента, значения которых превышают допустимые [3]. В таких режимах ЗМН двигателя должна отключать его без выдержки времени.

При отключении более удалённых КЗ появление недопустимо больших пиков возникает не сразу, а спустя некоторое время (рис. 1), поэтому в таких режимах двигатель нужно отключать с определённой выдержкой времени. Для достижения поставленных задач при определении параметров срабатывания ЗМН необходимо, чтобы защита в любом опасном режиме работы СД отключала его до того момента, когда будет достигнуто предельное время отключения, которое для каждого режима определяется по выражению

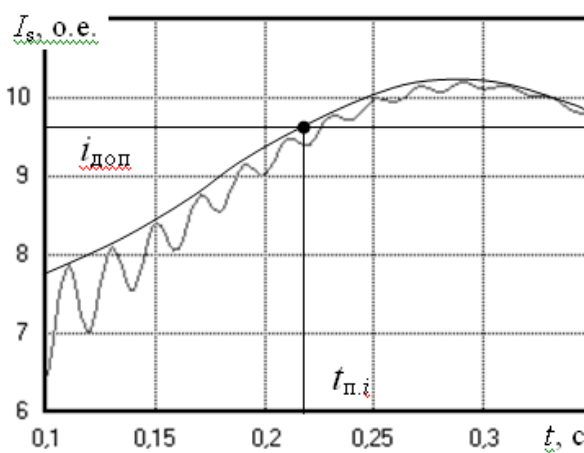
$$t_{\text{п}} = \min(t_{\text{п.д}}, t_{\text{п.м}} - t_{\text{откл}}, t_{\text{п.и}} - t_{\text{откл}}), \quad (1)$$

где  $t_{\text{п.д}}$  – предельное время отключения двигателя по условию сохранения им динамической устойчивости;  $t_{\text{п.м}}$  и  $t_{\text{п.и}}$  – время, определяемое по условию отсутствия недопустимо больших пиков тока и электромагнитного момента, возникающих при восстановлении питания двигателя;  $t_{\text{откл}}$  – полное время отключения выключателя.

Для определения параметров срабатывания ЗМН синхронного двигателя выполняется расчёт кривых изменения напряжения в месте подключения измерительного органа ЗМН при внешних коротких замыканиях различной степени удалённости, начиная с металлического КЗ на шинах питающей подстанции с последующим удалением места повреждения. Расчёт кривой изменения напряжения осуществляется до момента, соответствующего предельному времени отключения двигателя в данном режиме, если это время превышает 10 сек., то дальнейшие расчёты прекращаются.



а



б

Рис. 1. Изменение максимальных пиков электромагнитного момента (а) и тока статора (б) СД 4,8 МВт, возникающих при восстановлении питания двигателя после устранения внешнего КЗ, которое вызвало снижение напряжения на шинах питающей подстанции до уровня  $0,1 U_{\text{ном}}$ , в зависимости от длительности перерыва питания

Следует отметить, что если в состав системы электроснабжения входит несколько мощных электродвигателей, определение параметров срабатывания ЗМН необходимо начинать с наименее устойчивого. Это связано с тем, что отключение одного из них существенно влияет на предельное время отключения оставшихся в работе двигателей, а также на характер изменения напряжения на их выводах.

В микропроцессорных терминалах защиты электродвигателей фирм Siemens, ABB, Areva, Alstom предусмотрена стандартная функция представляющая собой двухступенчатую ЗМН. Одна из ступеней независимая, а вторая может иметь обратную зависимость характеристики срабатывания [4], время срабатывания которой определяется по выражению

$$t = t_{c.3} \left( 1 - \frac{U}{U_{c.3}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $t_{c.3}$  – уставка времени срабатывания;  
 $U_{c.3}$  – уставка напряжения срабатывания;  
 $U$  – приложенное напряжение.

Для определения параметров срабатывания ЗМН с такой характеристикой предлагается использовать следующий алгоритм:

1. По начальному напряжению в месте установки измерительного органа ЗМН в режимах, когда двигатель должен быть отключён без выдержки времени (рис. 2, кривые 1-8), определяется уставка срабатывания второй ступени  $U_{c.3}^{II}$  мгновенного действия.

2. Задаётся уставка первой ступени с обратной зависимой характеристикой срабатывания  $U_{c.3}^I$ . Эта уставка не должна быть ниже, чем напряжение, при котором двигатель может работать длительно без нарушения динамической устойчивости (удобно принять  $U_{c.3}^I$  равным напряжению срабатывания форсировки возбуждения).

3. Определяются режимы, которые не отключаются первой ступенью ЗМН. По кривым изменения напряжения в этих режимах (рис. 2, кривые 26-29) определяется относительное время, отсчитанное реле, при снижении напряжения ниже  $U_{c.3}^I$  по выражению

$$t = \sum_{i=0}^{n-1} \Delta t \left( 1 - \frac{U_i - U_{i+1}}{2U_{c.3}} \right), \quad (3)$$

где  $n$  – число точек кривой изменения напряжения;

$\Delta t$  – период выборки значений напряжения;  
 $U_i, U_{i+1}$  – значения напряжения в начале и конце  $i$ -го интервала.

Минимальное из полученных времён будет определять уставку времени срабатывания первой ступени  $t_{c.3}^I$ .

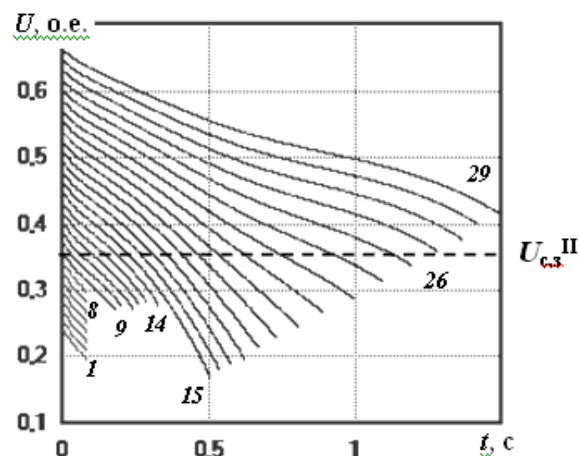


Рис. 2. Семейство кривых изменения напряжения на выводах статора СД 1,5 МВт при внешних трёхфазных КЗ различной степени удалённости

Расчёт параметров срабатывания ЗМН с комбинированной характеристикой по приведенному выше алгоритму для СД мощностью 1,5 МВт дал следующие результаты: I ступень (обратнозависимая) –  $U_{c.3}^I = 0,8U_{ном}$ ,  $t_{c.3}^I = 0,34$  с; II ступень (независимая) –  $U_{c.3}^{II} = 0,35 U_{ном}$ . Внешний вид характеристики приведен на рис. 3.

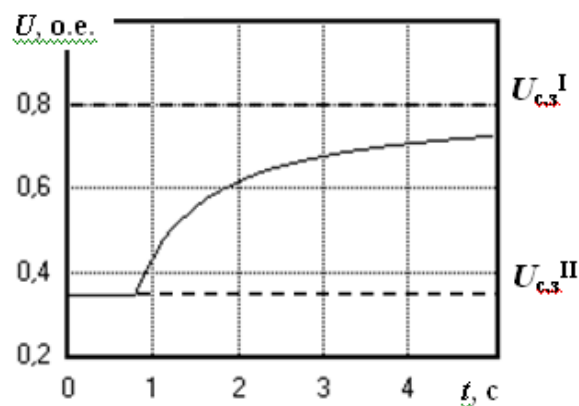


Рис. 3. Характеристика срабатывания ЗМН СД 1,5 МВт

Выбор параметров срабатывания ЗМН осуществляется по режиму трёхфазного КЗ, так как он является наиболее тяжёлым с точки зрения сохранения двигателем динамической устойчивости, а также появления более высоких значений пиков тока и электромагнитного момента по сравнению с другими видами повреждений.

Если ЗМН контролирует действующие напряжения в фазах и срабатывает по наименьшему из них (применяется логика «ИЛИ»), то при возникновении несимметричных КЗ защита также отключит двигатель в опасных режимах, так как, полученная по кривым 16-18 (рис. 4) выдержка времени первой ступени  $t_{с.з.}^I$  составила 0,72 с, что больше выбранного по режиму трёхфазного КЗ.

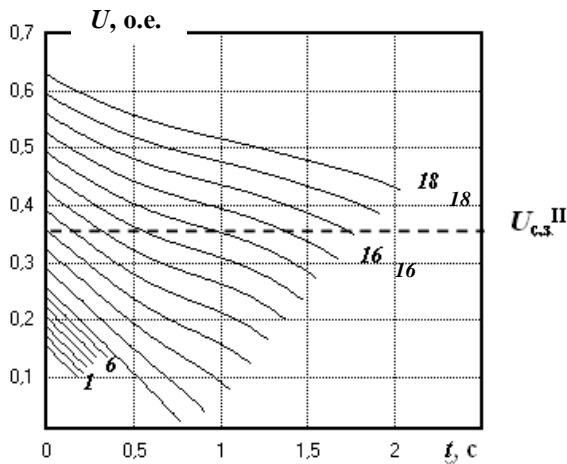


Рис. 4. Семейство кривых изменения напряжения на выводах статора СД 1,5 МВт при внешних двухфазных КЗ на землю различной степени удалённости

В микропроцессорных терминалах защиты упомянутых фирм производителей также применяется стандартная функция ЗМН, которая контролирует напряжение прямой последовательности. Данный параметр имеет более высокие значения при несимметричных коротких замыканиях, по сравнению с наименьшим напряжением в фазах, поэтому своевременное срабатывание защиты не произойдёт. Таким образом, использование напряжения прямой последовательности, в качестве параметра контролируемого ЗМН, при выборе уставок защиты по рассматриваемой методике недопустимо.

Параметры срабатывания многоступенчатых ЗМН, определённые с использованием предлагаемой методики, были применены на двух СД 4,8 МВт и двух СД 1,5 МВт компрессоров цехов производства карбамида Одесского припортового завода, упрощенная схема электроснабжения которого показана на рис. 5.

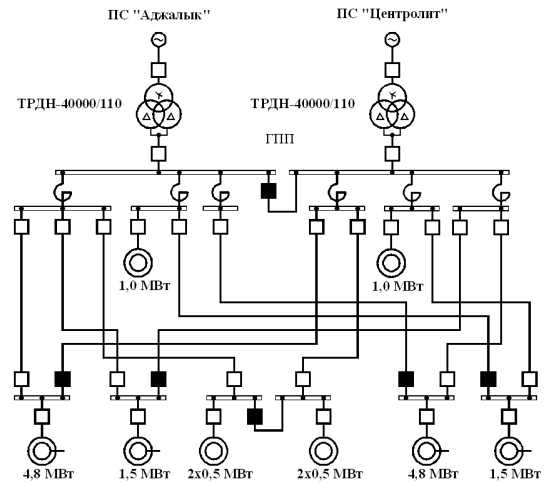


Рис. 5. Упрощенная схема электроснабжения цехов производства карбамида

Внедрение предложенных параметров срабатывания ЗМН позволило избежать отключений двигателей при кратковременных провалах напряжения на выводах статора до  $0,4 U_{ном}$ . Эффективность защит подтверждена опытом эксплуатации, годовой экономический эффект от внедрения составил 3,8 млн. грн.

Расчёт кривых изменения напряжения на выводах обмотки статора, а также пиков тока и электромагнитного момента, которые появляются в электродвигателях, требует расчёта электромагнитных и электромеханических переходных процессов по полным дифференциальным уравнениям элементов многомашинной системы с учётом их взаимного влияния. В связи с этим на основе математической модели изложенной в [5] автором разработана компьютерная программа Model (рис. 6), которая позволяет выполнить указанные расчёты в системах электроснабжения произвольной конфигурации, а также предусматривает автоматизацию расчётов по выбору параметров ЗМН синхронных двигателей.

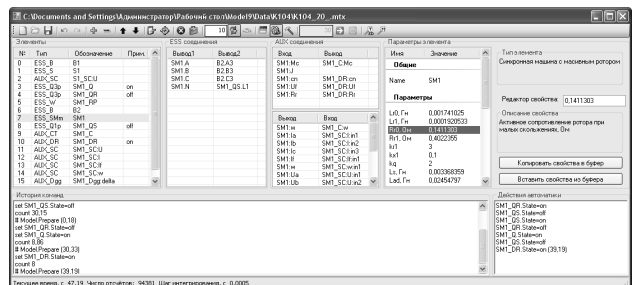


Рис. 6. Главное окно программы Model

## Выводы

1. Применение рассмотренной методики определения параметров срабатывания ЗМН синхронных двигателей ответственных агрегатов позволяет уменьшить число их отключений при КНЭ, а значит снизить ущерб от остановки технологического процесса.

2. Определение параметров срабатывания ЗМН по приведенной методике требует выполнения значительного объема расчетов, которые могут быть автоматизированы с применением разработанного программного обеспечения.

### Список использованной литературы

1. Носов, К. Б. Способы и средства самозапуска электродвигателей / К. Б. Носов, Н. М. Дворак. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.

2. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. ГОСТ 183-74, – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 27 с.

3. Бесараб, А. Н. Повышение надежности работы высоковольтных синхронных двигателей при кратковременных снижениях напряжения / А. Н. Бесараб, В. Н. Невольниченко, М. Ю. Шабовта // Электромашинобудування та електрообладнання. Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : Техніка. – 2004. – Вип. 63. – С. 54–58.

4. Устройство защиты и управления электродвигателем MiCOM P241. Техническое руководство. – М. : Alstom, 1999. – 193 с.

5. Шабовта, М. Ю. Математическая модель для расчета переходных режимов в многомашинной системе промышленного предприятия / М. Ю. Шабовта // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Наук.-техніч. журнал. – К. : Техніка. – 2011. – № 02 (78). – С. 62–67.

## References

1. Nosov, K. B. Ways and means of electric motors self-start / K. B. Nosov, N. M. Dvorak – Moscow : Energoatomizdat, 1992. – 144 p. [in Russian].

2. Rotating electrical machinery. General specifications. GOST 183-74. – Moscow : Publishing of standards, 1976. – 27 p. [in Russian].

3. Besarab, A. N. The operation reliability increasing of high-voltage synchronous motors at short-time voltage dip / A. N. Besarab, V. N. Nevolnichenko, M. U. Shabovta // Electric machine industry and electric equipment. Republican interdepartmental scientific and technical collection. – Kiev : Техніка. – 2004. – Vol. 63. – P. 54–58 [in Russian].

4. Protection and management device of electric motor MiCOM P241. Technical management. – Moscow : Alstom, 1999. – 193 p. [in Russian].

5. Shabovta, M. U. Mathematical model for calculation of transitional process in multimachine system of the industrial enterprise / M. U. Shabovta // Electrotechnical and computer systems. Scientific and technical magazine – Kiev: Техніка. – 2011. – № 02(78).– P. 62–67 [in Russian].



Шабовта  
Михаил Юрьевич,  
ст. преподаватель каф. эл.  
снабжения и энергетич. ме-  
неджмента Одесского нац.  
политехн. ун-та,  
тел.: (048) 734-85-67  
e-mail:  
poststudent@rambler.ru

Получено 10.09.2012