

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ ЗАЩИТЫ ОТ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сивокобыленко В. Ф., Талев Ахмед Асдо

Донецкий государственный технический университет

Vyf@elf.dgtu.donetsk.ua

On the base of full differential equalizations of asynchronous motors and transformers the mathematical model of electric power stations auxiliaries for analysis of asynchronous motors starting and restarting operations at open-phase modes is worked up.

В системах электроснабжения собственных нужд (с.н.) электрических станций и промышленных предприятий широко применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутыми роторами единичной мощностью 200 - 8000 кВт на напряжения 6 - 10 кВ и до 200 кВт на напряжения 380 - 500 В. В таких системах электроснабжения часто возникают режимы работы, когда имеет место несимметрия фазных и линейных напряжений. При этом наибольшую опасность для АД представляют напряжения и токи обратной последовательности, так как они вызывают дополнительный нагрев обмотки статора и ротора АД, что может привести к выходу последних из строя. Наибольшую опасность для АД представляют неполнофазные режимы при полностью оборванной одной из фаз питающего напряжения. Длительная работа АД в этом режиме не допускается из-за дополнительного нагрева обмотки статора и ротора и возможного повреждения АД.

Особенно затрудняется пуск и самозапуск двигателей в неполнофазных режимах, а допустимое время нахождения при этом существенно сокращается по сравнению со случаем симметричного питания. Так как согласно ПУЭ защита от неполнофазных режимов двигателей и пускорезервных трансформаторов не предусматривается, то работниками различных организаций предложен ряд такого рода защит [1-5]. Однако, до настоящего времени отсутствуют рекомендации по определению выдержки времени защит от неполнофазных режимов АД и трансформаторов.

В данной работе эта проблема решается методом математического моделирования режимов пуска и самозапуска двигателей в неполнофазном режиме. За основу приняты полные дифференциальные уравнения двигателей, трансформаторов и питающих линий электропередачи и записаны они для напряжений и токов прямой и обратной последовательностей.

Дифференциальные уравнения для АД записаны применительно к эквивалентной двухконтурной схеме замещения ротора, метод расчета параметров для которой изложен в [6].

Как известно [7], при несимметричных питающих напряжениях модель асинхронного электропривода можно представить как состоящую из двух двигателей, каждый из которых подключен соответственно к симметричным системам напряжений, создающим соответственно моменты прямой M_1 и обратного M_2 вращения. Оба двигателя и механизм объединены общим валом (рис. 1).

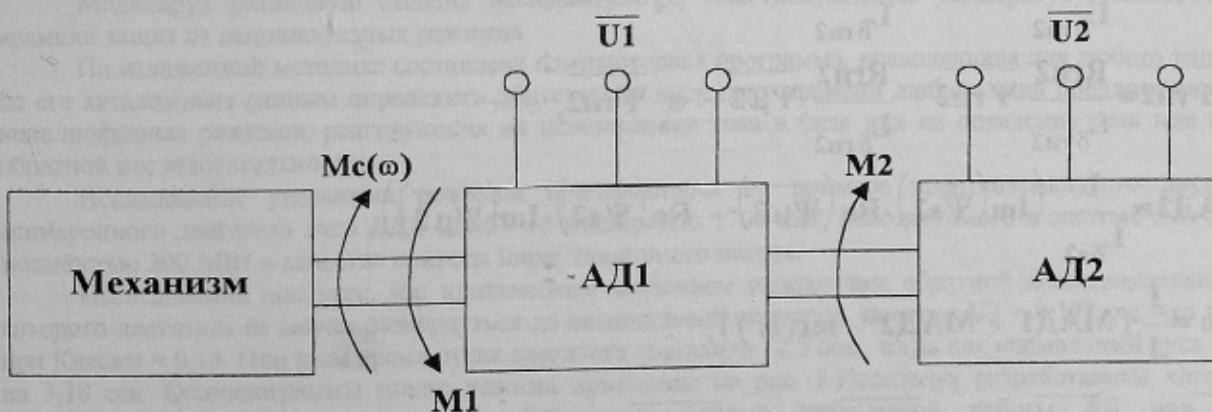


Рисунок 1 - Модель асинхронного электропривода при несимметричных фазных питающих напряжениях

Система с.н. 6кВ электростанций работает с изолированной нейтралью, в связи с чем нейтрали обмоток статоров АД не заземляют и по ним не могут протекать токи нулевой последовательности. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать модель (рис. 1), в которой имеет место несимметрия в питающей сети, но отсутствует составляющие напряжения нулевой последовательности ($3U_0 = 0$). Тогда, если фазные напряжения питающей сети несимметричны ($U_{a\max} \neq U_{b\max} \neq U_{c\max}$), т.е. они имеют разные

амплитуды, но изменяются по синусоидальному закону, то сумма их мгновенных значений в каждый момент времени будет равна нулю.

Пусть требуется смоделировать режим работы АД, если заданы: коэффициент загрузки механизма K_3 , коэффициент несимметрии напряжений, определяемый отношением напряжения обратной последовательности к напряжению прямой $K_{\text{несим}} = U_2 / U_1$, модуль результирующего вектора напряжения U_{max} . По этим данным можно найти модули векторов напряжения прямой и обратной последовательностей как:

$$U_{1\text{max}} = U_{\text{max}} / (1 + K_{\text{несим}}) \quad (1)$$

$$U_{2\text{max}} = K_{\text{несим}} + U_{\text{max}} / (1 + K_{\text{несим}})$$

$$\overline{U_1} = U_{1\text{max}} \cdot e^{ip_1} \quad \overline{U_2} = U_{2\text{max}} \cdot e^{ip_2}$$

где p_1, p_2 - начальные фазы векторов напряжений $\overline{U_1}, \overline{U_2}$ принимаемые любыми.

Для учета нагрева обмоток АД в несимметричных режимах систему полных дифференциальных уравнений (ДУ) каждого из двигателей М1 и М2 [7] дополним ДУ для определения количества выделяющегося тепла в обмотке статора Q_s , верхней $Q_{\text{рв}}$ и нижней $Q_{\text{рн}}$ клетках ротора:

$$P \overline{\Psi_{s1}} = \overline{U_1} - \frac{R_{s1}}{L_{\delta s1}} \cdot \overline{\Psi_{s1}} + \frac{R_{s1}}{L_{\delta s1}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 1}},$$

$$P \overline{\Psi_{\text{рв1}}} = \frac{R_{\text{рв1}}}{L_{\delta \text{рв1}}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рв1}}} + \frac{R_{\text{рв1}}}{L_{\delta \text{рв1}}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 1}} - \omega \cdot \overline{\Psi_{\text{рв1}}},$$

$$P \overline{\Psi_{\text{рн1}}} = \frac{R_{\text{рн1}}}{L_{\delta \text{рн1}}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рн1}}} + \frac{R_{\text{рн1}}}{L_{\delta \text{рн1}}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 1}} - \omega \cdot \overline{\Psi_{\text{рн1}}},$$

$$M_{\text{АД1}} = \frac{1}{L_{\delta s1}} \left(\text{Im}(\overline{\Psi_{s1}}) \cdot \text{Re}(\overline{\Psi_{\mu 1}}) - \text{Re}(\overline{\Psi_{s1}}) \cdot \text{Im}(\overline{\Psi_{\mu 1}}) \right),$$

$$P \overline{\Psi_{s2}} = \overline{U_2} - \frac{R_{s2}}{L_{\delta s2}} \cdot \overline{\Psi_{s2}} + \frac{R_{s2}}{L_{\delta s2}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 2}},$$

$$P \overline{\Psi_{\text{рв2}}} = \frac{R_{\text{рв2}}}{L_{\delta \text{рв2}}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рв2}}} + \frac{R_{\text{рв2}}}{L_{\delta \text{рв2}}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 2}} - \omega \cdot \overline{\Psi_{\text{рв2}}},$$

$$P \overline{\Psi_{\text{рн2}}} = \frac{R_{\text{рн2}}}{L_{\delta \text{рн2}}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рн2}}} + \frac{R_{\text{рн2}}}{L_{\delta \text{рн2}}} \cdot \overline{\Psi_{\mu 2}} - \omega \cdot \overline{\Psi_{\text{рн2}}},$$

$$M_{\text{АД2}} = \frac{1}{L_{\delta s2}} \left(\text{Im}(\overline{\Psi_{s2}}) \cdot \text{Re}(\overline{\Psi_{\mu 2}}) - \text{Re}(\overline{\Psi_{s2}}) \cdot \text{Im}(\overline{\Psi_{\mu 2}}) \right), \quad (2)$$

$$P \omega = \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{АД1}} + M_{\text{АД2}} - m_c(\omega)),$$

$$\overline{\Psi_{\mu 1}} = a_{s1} \cdot \overline{\Psi_{s1}} + a_{\text{рв1}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рв1}}} + a_{\text{рн1}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рн1}}}$$

$$\overline{\Psi_{\mu 2}} = a_{s2} \cdot \overline{\Psi_{s2}} + a_{\text{рв2}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рв2}}} + a_{\text{рн2}} \cdot \overline{\Psi_{\text{рн2}}}$$

$$P Q_s = \Delta P_s^{\text{несим}} - \Delta P_s^{\text{ном}} = \left[R_{s1} \cdot \left(\left| \overline{I_{s1}} \right|^2 + R_{s2} \cdot \left(\left| \overline{I_{s2}} \right|^2 \right) \right] - R_s \cdot \left(I_s^{\text{ном}} \right)^2$$

$$P_{Q_{ГВ}} = \Delta P_{ГВ}^{\text{несим}} - \Delta P_{ГВ}^{\text{ном}} = \left[R_{ГВ1} \cdot \left(\overline{I_{ГВ1}} \right)^2 + R_{ГВ2} \cdot \left(\overline{I_{ГВ2}} \right)^2 \right] - R_{ГВ} \cdot \left(I_{ГВ}^{\text{ном}} \right)^2$$

$$P_{Q_{ГН}} = \Delta P_{ГН}^{\text{несим}} - \Delta P_{ГН}^{\text{ном}} = \left[R_{ГН1} \cdot \left(\overline{I_{ГН1}} \right)^2 + R_{ГН2} \cdot \left(\overline{I_{ГН2}} \right)^2 \right] - R_{ГН} \cdot \left(I_{ГН}^{\text{ном}} \right)^2$$

где:

$Q_s, Q_{ГВ}, Q_{ГН}$ - превышение количества выделяющегося тепла в обмотке статора, верхней и нижней обмотках ротора в несимметричном режиме по сравнению с симметричным номинальным режимом;

$\Delta P_s^{\text{ном}}, \Delta P_{ГВ}^{\text{ном}}, \Delta P_{ГН}^{\text{ном}}$ - соответственно потери в обмотке статора, верхней и нижней обмотках ротора в симметричном номинальном режиме работы;

$\Delta P_s^{\text{несим}}, \Delta P_{ГВ}^{\text{несим}}, \Delta P_{ГН}^{\text{несим}}$ - соответственно потери в обмотке статора, верхней и нижней обмотках ротора в несимметричном режиме работы.

Обозначения остальных величин в (2) принято как в [7].

В уравнениях (2) принято, в симметричном режиме их правая часть равна нулю и температура обмоток статора и ротора не возрастает так, как все тепло отдается в окружающую среду.

Представленная математическая модель позволяет исследовать пусковые динамические характеристики АД при разных степенях несимметрии питающего напряжения вплоть до полного обрыва одной из фаз (при этом $U_1 = U_2$). Представляется возможным оценить допустимость и успешность пуска и самозапуска АД при различных значениях $K_{\text{несим}}$. Известно, что в режиме работы с номинальной нагрузкой на шинах с.н. допускается значение $U_2 \leq 0,02$ о.е.

Однако, в настоящее время отсутствуют исследования режимов пуска и самозапуска отдельных АД системы с.н. при несимметричном питающем напряжении.

При анализе режима группового самозапуска, систему уравнений (2) дополняем уравнениями падения напряжения трансформатора (3)

$$P_{I_{Гр}} = \frac{\overline{U_c} - \overline{U_{ш}}}{L_{Гр} + L_{Л}} - \frac{R_{Гр} + R_{Л}}{L_{Гр} + L_{Л}} \cdot \overline{I_{Гр}}, \quad (3)$$

где $R_{Л}, R_{Гр}, L_{Л}, L_{Гр}$ - соответственно активные и индуктивные сопротивления питающего трансформатора и ЛЭП.

Температура нагрева обмоток в несимметричных режимах определяется с помощью дифференциальных уравнений путем нахождения количества тепла, выделяющегося в обмотках статора и ротора.

Предельно допустимые температура и количество тепла в обмотках принимаются по результатам моделирования двух пусков подряд из холодного состояния двигателя от номинального симметричного напряжения.

Моделируя различную степень несимметрии и, зная допустимую температуру, находим выдержки времени защит от неполнофазных режимов.

По изложенной методике составлена компьютерная программа, позволяющая для любого типа двигателя по его каталожным данным определить допустимую выдержку времени любого типа предложенных защит от неполнофазных режимов, реагирующих на исчезновение тока в фазе или на появление тока или напряжения обратной последовательности.

Исследование указанных режимов производилось на примере короткозамкнутого двухклеточного асинхронного двигателя типа ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт, используемого в системе с.н. 6 кВ блоков мощностью 200 МВт в качестве привода циркуляционного насоса.

Исследования показали, что критическим значением напряжения обратной последовательности, выше которого двигатель не может развернуться до номинальной скорости, является $U_2 = 0,123$ о.е. что имеет место при $K_{\text{несим}} = 0,14$. При этом время пуска двигателя составило 12,5 сек., тогда как нормальный пуск происходит на 3,18 сек. Осциллограммы такого режима приведены на рис. 2. Используя разработанные алгоритм (2) и методику моделирования получены обобщенные кривые допустимой работы АД при различных коэффициентах загрузки и при разных степенях несимметрии питающего напряжения. Такие зависимости для двигателя типа ВДД 213 / 54 - 16 мощностью 1700 кВт приведены на рис. 3 и в табл. Они могут быть использованы при выборе уставок срабатывания устройств релейной защиты от неполнофазных режимов АД.

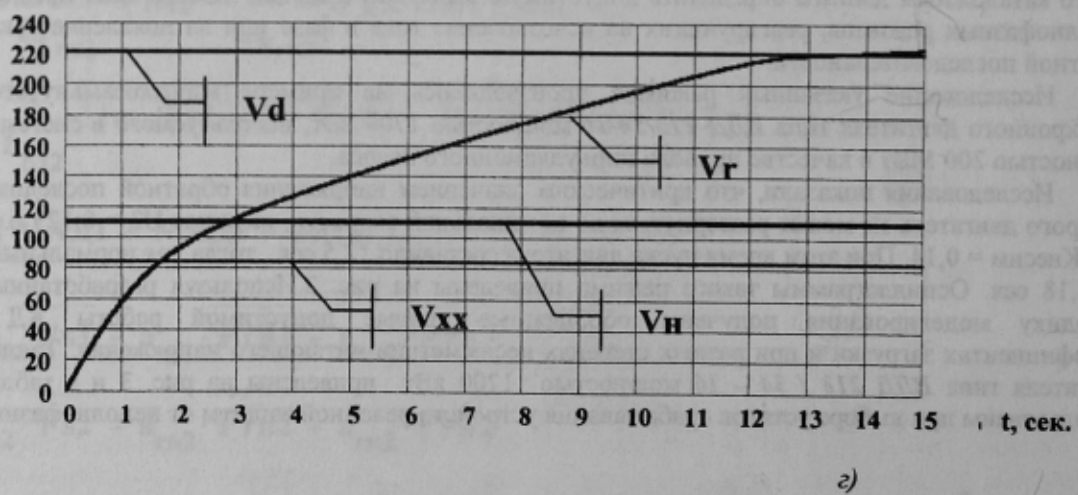
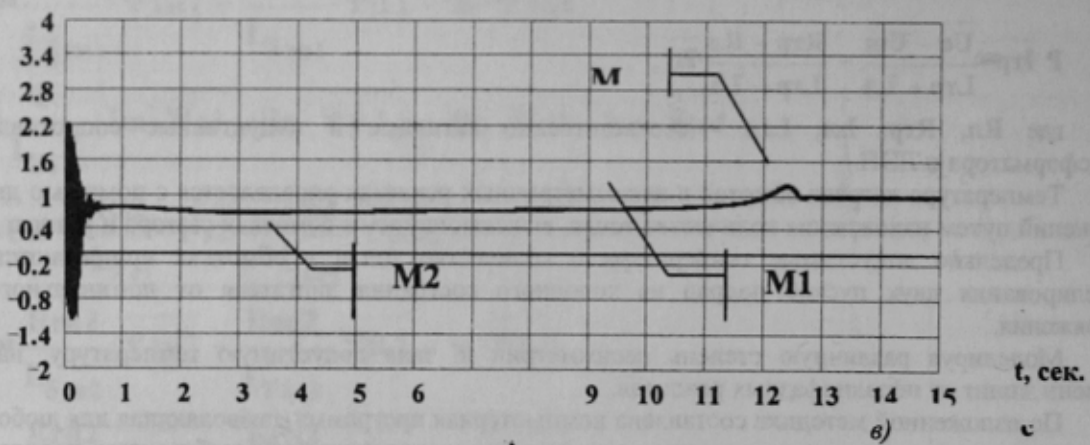
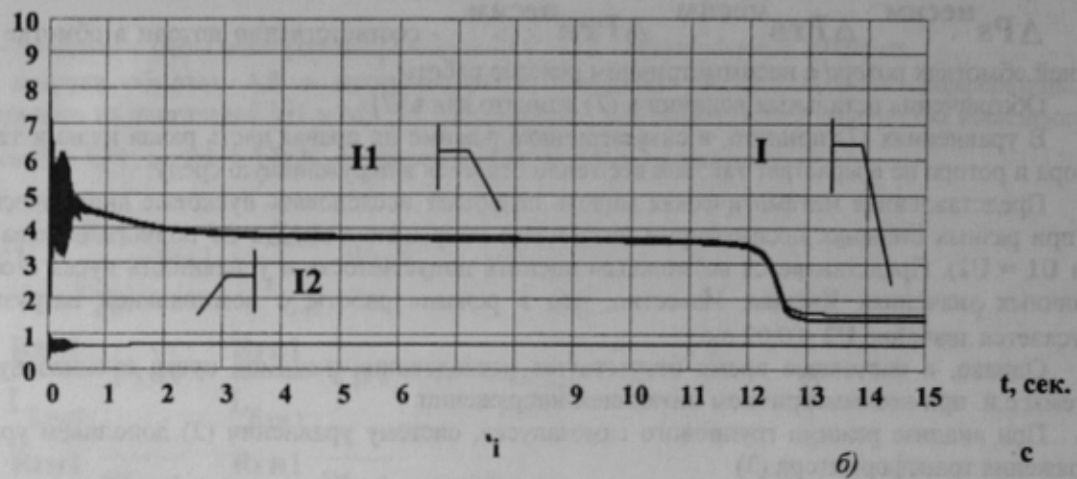
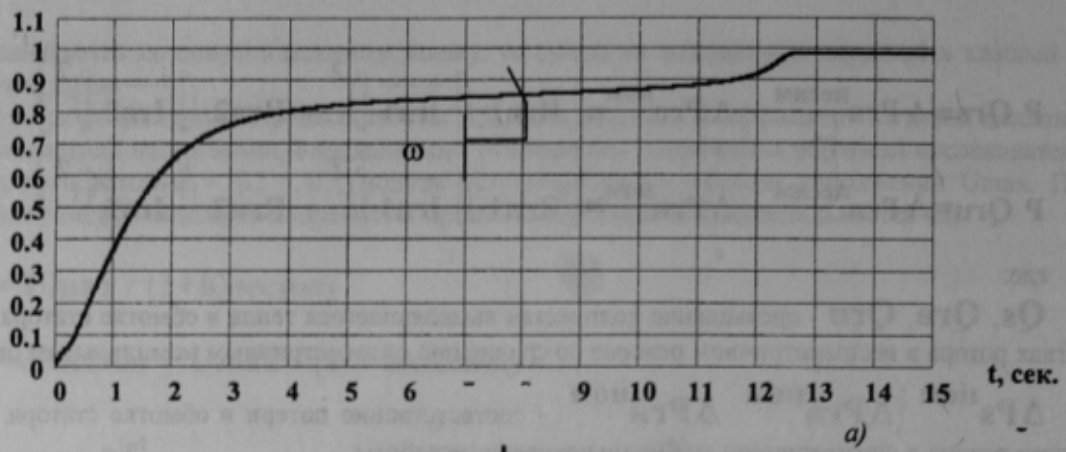


Рисунок 2 - Скорость вращения (а), токи (б), моменты (в) и температура нагрева (г) обмоток статора и ротора АД типа ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт в режиме пуска при $K_z=1$ и $K_{несим}=0,14$.

Таблица – Допустимое время работы (сек.) АД типа ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт в неполнофазном режиме

	Коэффициент несимметрии (Кнесим) в отн. ед.									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$K_3 = 0,5$	48	24	18,5	15	12	9,2	7,28	6,22	5,25	5
$K_3 = 0,75$	36	18	13,5	10,5	7,9	6,5	5,74	5,2	5,1	5
$K_3 = 1$	21	10,5	8,35	7	6,1	5,55	5,18	5,13	5,05	5

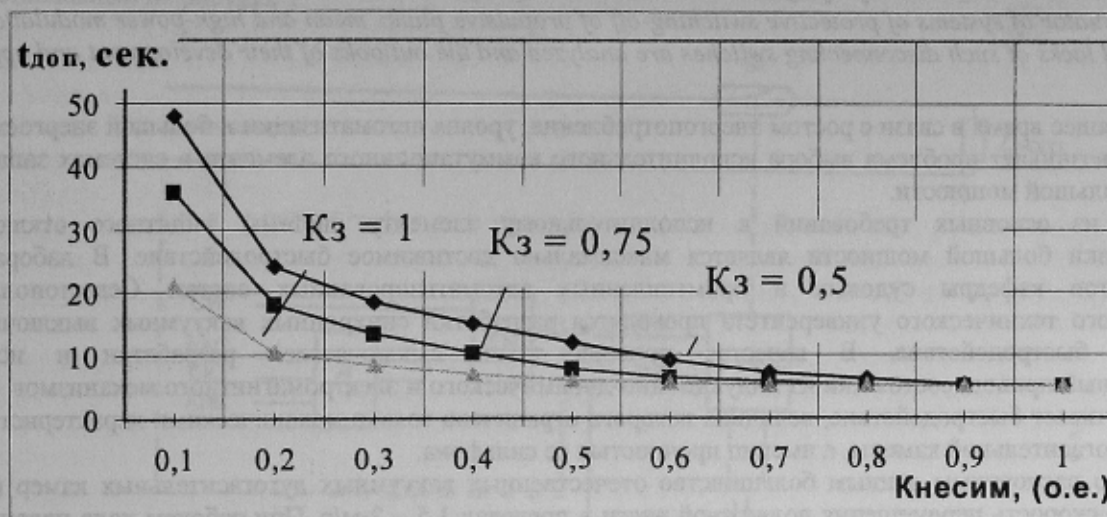


Рисунок 3 - Допустимое время работы АД типа ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт в неполнофазном режиме

Аналогичные кривые (рис. 3) были получены для всех двигателей с.н. блоков 200 и 300 МВт.

Выводы.

1. На основе полных ДУ асинхронных двигателей и трансформаторов разработана математическая модель системы электроснабжения с.н. электростанций для анализа режимов пуска и самозапуска АД при ННР, позволяющая определить температуру нагрева обмоток статора и ротора.
2. Установлены зависимости температуры нагрева обмоток статора и ротора АД собственных нужд от степени несимметрии питающего напряжения, коэффициента загрузки механизма с.н. и параметров трансформатора и ЛЭП.
3. Получены кривые допустимого времени работы АД в функции от Кнесим и K₃, что позволяет определить выдержки времени работы защиты от ННР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Расчеты – М.: Энергоатом издат, 1985-96с.
2. Попов В.А., Онищенко О.А., Чередниченко К.В. Защита двигателей 6-10 гВ от неполнофазного режима на стороне 110-220гВ трансформатора с разземленной нейтралью. Электрические станции, 1990, № 8, с.73-75.
3. Сивокобыленко В. Ф., Асдо Талейб Ахмед. Защита электродвигателей собственных нужд электростанций от обрыва фазы в питающей сети. Труды Донецкого государственного технического университета (Сборник научных трудов ДонГТУ). Серия: электротехника и энергетика. Выпуск 4. Донецк: ДонГТУ, 1999, с.181-185.
4. Сивокобыленко В.Ф., Асдо Талейб Ахмед. Защита пускорезервного трансформатора собственных нужд электростанций от обрыва фазы в питающей сети. Праці Донецького державного технічного університету (Збірник наукових праць ДонДТУ). Серія електротехніка і енергетика. Випуск 17. Донецьк. ДонДТУ, 2000, с. 134 - 137.
5. Алексеев В.С., Варганов Г.П., Панфилов Б.И., Розенблом Р.З. Реле защиты. М., Энергия, 1976, 464с.
6. Сивокобыленко В. Ф., Асдо Талейб Ахмед Расчет потерь в асинхронном двигателе при обрыве фазы в питающей цепи. Электромеханика и электроэнергетика. Сб. науч. тр. Энергетич. ф- та. – Донецк, ДонГТУ, 1998. - стр. 34 - 39.
7. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. Учебное пособие. - Донецк: ДПИ, 1984,- 116 с.