



**“Fizika-2005”**  
**Beynəlxalq Konfrans**  
**International Conference**  
**Международная Конференция**

7 - 9 **İyun** **June** **2005** №116 **səhifə** **page** **441-446**  
**Июнь** **стр.**

**Bakı, Azərbaycan**

**Baku, Azerbaijan**

**Баку, Азербайджан**



**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СЕТЕЙ ПИТАНИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ  
С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

**ВИШТИБЕЕВ А.В.**

*Новосибирский государственный технический университет  
пр. Карла Маркса, 20, факультет Энергетики, кафедра «Электрические станции», 630092,  
Россия  
Телефон +7(3832) 46-13-73, 46-11-22; Факс +7(3832) 46-13-53;  
e: mail: axe@pst.power.nstu.ru, axxe@mail.ru*

Рассматриваются вопросы релейной защиты сетей питания узлов нагрузки с синхронными двигателями. Сравниваются режимы высокоомного и низкоомного заземления нейтрали и варианты исполнения защит от замыканий на землю. Подробно рассмотрены вопросы о перенапряжениях, возникающих при коммутациях электродвигателей. Доказано, что наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений является демпфирующая RC-цепочка.

In the article questions of relay protection of networks of loading units feed with synchronous engines are considered. Modes of high-resistance and low-resistance grounding of a neutral and variants of protection performance are compared.

Relay protection, as a rule, is not capable to disconnect feeder with ground fault because of insufficient sensitivity and small values of ground fault capacitor current, therefore all electric network is long is under influence dangerous arc overvoltages and ferroresonant phenomena.

To prevention of these phenomena apply resistive grounding of the neutral of the electric network. Operate setting of protection against ground fault and algorithms of functioning of this protection are submitted. Questions about overvoltages arising at switching engines are in detail considered.

All cases of sudden change of a mode, (such as ground fault etc.) and switching off the engine result to overvoltages, dangerous to stator insulation of the engine. Hence, for reliable operation of the engine equipment by protective devices is necessary. By the example of evident oscillograms and tables efficiency of application of RC-circuits for engines protection against overvoltages at various switching off it is proved.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время сети 6 и 10 кВ питания узлов нагрузки с синхронными двигателями (СД) работают с изолированной нейтралью. Наиболее распространенный вид повреждений в таких сетях - однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) с перемежающейся дугой. Возникающие при этом перенапряжения (до 3-4.5  $U_{\text{фmax}}$ ) [1] весьма опасны для электрооборудования, и в первую очередь для электродвигателей, кабелей и трансформаторов напряжения. Шаговое напряжение и напряжение прикосновения в месте ОЗЗ опасно для людей и животных.

Кабельная изоляция (в отличие от воздушной) не является самовосстанавливающейся, поэтому самоликвидация однофазных замыканий в этих сетях невозможна.

При этом, релейная защита, как правило, не способна отключить присоединение с ОЗЗ из-за недостаточной чувствительности и малых значений

емкостного тока ОЗЗ, поэтому вся сеть 6-10 кВ длительно находится под воздействием опасных дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений.

Для предотвращения этих явлений применяют резистивное заземление нейтрали сети 6-10 кВ. Рассмотрим два способа резистивного заземления нейтрали – высокоомное и низкоомное [2, 3].

## **РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ**

### **Высокоомное заземление нейтрали**

К секции сборных шин 6-10 кВ через выключатель подключается специальный трансформатор заземления нейтрали (ТЗН) со схемой соединения  $Y_0/\Delta$ .

Следует отметить, что для эффективности резистивного заземления нейтрали к специальному трансформатору должно предъявляться требование достаточной его мощности. Необходима такая конструкция его магнитопровода, чтобы поток

нулевой последовательности замыкался по возможности по воздуху, а не по стали.

При присоединении резистора в нейтраль сети через индуктивность специального устройства эффективность резистивного заземления нейтрали снижается.

Поэтому следует оценить максимально допустимую величину индуктивности нулевой последовательности этого устройства. Упрощенная схема для расчета процессов после погасания дуги приведена на рис. 1.

### Расчетная схема для определения напряжения на нейтрали после погасания дуги

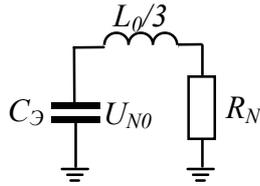


Рис. 1.

В схеме рис. 1:

$U_{N0}$  – напряжение на нейтрали;

$L_0$  – индуктивность нулевой последовательности устройства для присоединения резистора;

$C_3$  – эквивалентная емкость сети.

Процессы при ОДЗ носят апериодический характер при соблюдении условия:

$$\alpha^2 \geq \omega_0^2,$$

где  $\alpha = \frac{3R_N}{2L_0}$ ,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_3}}$

Это условие при подстановке

$$R_N \leq \frac{1}{3 \cdot k_R \omega C_3},$$

переписывается в виде:

$$L_0 \leq \frac{1}{4 \cdot k_R^2 \omega^2 C_3},$$

где  $k_R \geq 1$ .

Напряжение на нейтрали в случае апериодического процесса определится по выражению:

$$\frac{u_N(t)}{U_{N0}} = \frac{\omega_0^2}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega^2}} \left[ \frac{1}{p_2} e^{p_2 t} - \frac{1}{p_1} e^{p_1 t} \right]$$

где  $p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ .

На рис. 2 приведены процессы на нейтрали после погасания дуги при  $C_3=1$  мкФ и трех значениях индуктивности, для которых при  $k_R=1$  процесс является апериодическим (предельное значение индуктивности  $L_0=2.5$  Гн).

Из рисунка следует, что при всех рассмотренных индуктивностях напряжение на нейтрали через половину периода промышленной частоты практически становится нулевым.

Заземление нейтрали выполняется одним из двух способов.

Первый способ – между нулевой точкой обмотки ВН и «землей» включается высоковольтный резистор  $R_N$ , рис. 3,а.

### Напряжения на нейтрали сети после погасания дуги при установке на секциях устройства для создания нейтральной точки сети; $k_R=1$

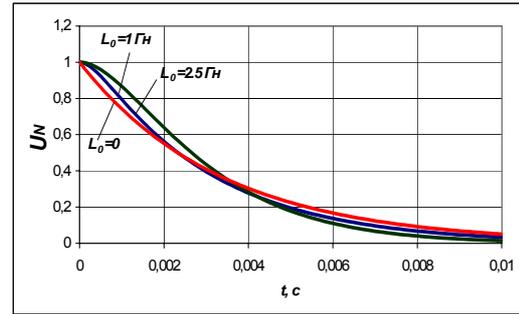


Рис. 2.

Второй способ – нейтраль обмотки ВН соединяется с землей, а во вторичную обмотку ТЗН включается резистор  $R_\Delta$ , при этом трансформатор ТЗН должен быть пятистержневой конструкции, рис. 3,б. Сопротивление резистора выбирается из условия, чтобы активная составляющая тока замыкания на землю была равна или больше емкостной:  $I_R \geq I_C$ , при этом  $R_N = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_C}$

$$R_\Delta = \frac{27U}{\sqrt{3} \cdot K^2 \cdot I_C}$$

где  $U$  – линейное напряжение сети;

$I_C$  – полный емкостной ток ОЗЗ;

$K=U_Y/U_\Delta$  – коэффициент трансформации ТЗН.

### Схема резистивного заземления нейтрали сети 6-10 кВ через высоковольтный (а) и низковольтный (б) резистор

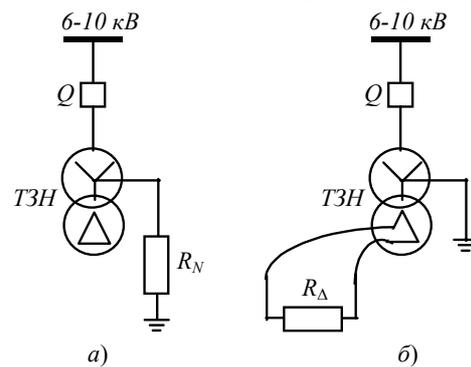


Рис. 3.

Расчетная мощность ТЗН определяется выражением:

$$S = \frac{U^2}{3R_N}$$

Ток в месте ОЗЗ равен геометрической сумме емкостного тока сети и тока, создаваемого устройством заземления нейтрали. С учетом  $I_R \geq I_C$  имеем:

$$I_{OЗЗ} \geq \sqrt{2} I_C$$

Если сопротивление резистора  $R_N$  ( $R_\Delta$ ) больше расчетного, то есть, ток  $I_C > I_R$ , то кратность перенапряжений в сети увеличивается.

#### **Преимущества высокоомного заземления нейтрали по сравнению с сетью с изолированной нейтралью:**

- снижение кратностей дуговых перенапряжений при ОЗЗ до безопасного уровня и ликвидация феррорезонансных явлений;
- возможность сравнительно безопасной длительной работы сети без отключения заземленного присоединения.

#### **Недостатки высокоомного заземления нейтрали:**

- контроль за соотношением  $I_R > I_C$  – при подключении новых сетей требуется изменять величину сопротивления резистора и проверять достаточность мощности ТЗН;
- большие потери энергии в режиме отыскания присоединения с ОЗЗ или работы с ОЗЗ. Например, при емкостном токе сети 3 А в резисторе рассеивается мощность не менее 18 кВт, при емкостном токе 5 А – 30 кВт, при емкостном токе 7 А – 42,5 кВт.
- сохраняется вероятность поражения людей и животных током ОЗЗ.

#### **Низкоомное резистивное заземление нейтрали**

К секции сборных шин через выключатель подключается специальный трансформатор заземления нейтрали типа ТСНЗ-63/10 мощностью 63 кВА со схемой соединения  $Y_0/\Delta$ . Между нулевой точкой обмотки ВН и «землей» включается резистор с сопротивлением 100 Ом для сетей 6 кВ или 150 Ом для сетей 10 кВ. Трансформатор ТСНЗ и включенные в нейтраль резистор и трансформатор тока типа ТЛК10-5-0,5/10Р-50/5 размещены в шкафу заземления нейтрали ШЗН.

В месте ОЗЗ протекает геометрическая сумма емкостного тока сети  $I_C$  и тока  $I_R$ , создаваемого устройством заземления нейтрали. При малом емкостном токе  $I_C$  им можно пренебречь и считать, что ток ОЗЗ равен 35-40 А.

#### **Преимущества низкоомного заземления нейтрали:**

- снижение кратностей дуговых перенапряжений при ОЗЗ до безопасного уровня и ликвидация феррорезонансных явлений;
- четкая работа релейной защиты от ОЗЗ на отключение поврежденного присоединения.

#### **Недостатки низкоомного заземления нейтрали:**

- если резистор нетермостойкий [2, 3] (допускается протекание тока 40 А в течение 1,5 с, 5А – в течение 1 часа), в случае редких, но возможных отказов защиты или выключателя присоединения с ОЗЗ на ТЗН предусматривается защита нулевой последовательности, которая либо отключает питание секции, либо сам ТЗН, переводя сеть в режим с изолированной нейтралью.

Шкафы заземления нейтрали устанавливают в ЗРУ 6-10 кВ по одному на секцию, предпочтительно не в ряд с ячейками КРУ, а отдельно у стены (в случае нетермостойкого резистора).

Защита от ОЗЗ в сети организуется, следующим образом – на всех линиях питания одиночных электроприемников, в том числе электродвигателей, устанавливается релейная защита нулевой последовательности с использованием трансформаторов тока типа ТЗЛМ и цифровых терминалов или реле РТЗ-51 (или РТ-40/0.2) с действием на отключение этих присоединений без выдержки времени. Если кабельная линия состоит из нескольких кабелей (от двух до пяти), то трансформаторы тока ТЗЛМ устанавливают на каждом кабеле, а их вторичные обмотки, соединенные параллельно, подключают к одному терминалу или к реле РТЗ-51.

Уставки защиты от замыканий на землю этих присоединений выбирают по выражению:

$$I_{C3} = K_H \cdot K_B \cdot I_C,$$

где  $K_H$  – коэффициент надежности, принимается равным 1.2;  $K_B$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока (для реле РТЗ-51 принимается равным 2-3, для реле РТЗ-50 – 3-4; для цифровых терминалов – 1.2;  $I_C$  – первичный емкостной ток нулевой последовательности, протекающий по защищаемому присоединению при ОЗЗ на секции ЗРУ-6-10 кВ.

Если в сети имеются секции питания групп электроприемников, то на линиях питания этих секций устанавливают такую же защиту нулевой последовательности, но с действием на отключение с выдержкой времени для отстройки от работы мгновенных защит от ОЗЗ линий, отходящих от РУ СН. Ток срабатывания этой защиты принимают из условия согласования с защитами отходящих от РУ СН линий:

$$I_{C3} = 1.4 \cdot I_{C3max} \text{ РУСН},$$

где  $I_{C3max} \text{ РУСН}$  – максимальный ток срабатывания защит нулевой последовательности линий, отходящих от РУ СН.

Время срабатывания защиты от ОЗЗ РУ СН принимают 0.4-0.5с при применении электромеханических реле и 0.3 с – при применении цифровых терминалов.

На линиях питания ТЗН защита от ОЗЗ служит для резервирования защит от замыканий на землю отходящих линий, а также для предотвращения длительного обтекания током ОЗЗ нетермостойкого резистора. Она может выполняться в двух вариантах.

## **ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ**

### **Первый вариант**

Защита нулевой последовательности ТЗН выполняется двухступенчатой. С первой выдержкой времени она действует на отключение секционного выключателя, со второй – на отключение выключателя «своего» ввода 6-10 кВ секции (не действует на отключение выключателя ТЗН). Ток срабатывания защиты выбирают по выражению:

$$I_{C3} = 1.4 \cdot I_{C3max} \text{ ЗРУ},$$

где  $I_{C3max} \text{ ЗРУ}$  – максимальный из токов срабатывания защит нулевой последовательности линий, отходящих от ЗРУ.

Время срабатывания принимается на ступень селективности больше времени срабатывания защит

от ОЗЗ отходящих от шин линий. Например, в схеме без РУ СН – и применении электрохимических защит время срабатывания составит: на отключение секционного выключателя – 0.5 с, на отключение «своего» вводного выключателя ЗРУ – 1.0 с. В схеме с РУСН – соответственно 1.0 и 1.4 с. При применении цифровых терминалов эти времена соответственно составят в схеме без РУ СН 0.3 и 0.6 с, в схеме с РУ СН – 0.6 и 0.9 с.

### Второй вариант

Защита нулевой последовательности ТЗН с выдержкой времени действует на отключение выключателя ТЗН, переводя тем самым сеть в режим работы с изолированной нейтралью. Со второй выдержкой времени эта защита может действовать на отключение ввода и секционного выключателя (в случае, если выключатель ТЗН не отключился).

Выбор уставок выполняется аналогично первому варианту.

На наш взгляд, этот вариант, неприемлем, так как, несмотря на то, что резистор ограничит перенапряжения в начальной стадии и позволит селективно выявить поврежденный элемент, его последующее отключение от нейтрали приведет к коммутациям и переводу сети в режим изолированной нейтрали с известными недостатками.

Кроме того, отметим, что в *Первом варианте* при возникновении ОЗЗ на шинах ЗРУ оно отключается, во *Втором* – остается не отключенным.

В качестве основной защиты ТЗН целесообразно применять токовую отсечку с первичным током срабатывания 100-150 А. ТЗН необходимо оснастить автоматикой, обеспечивающей такой режим работы, при котором сеть 6-10 кВ была бы заземлена не более, чем в одной точке, через один трансформатор ТЗН, и ток замыкания на землю не превышал бы 40 А.

Рассмотрим более подробно вопрос о перенапряжениях, возникающих при коммутациях электродвигателей.

## ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИЯХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В табл. 1 приведены кратности перенапряжений, возникающие при отключении двигателя при различных токах среза и  $t_0=100 \text{ мкс}$  (время между началом расхождения контактов и прохождением отключаемого тока промышленной частоты через нулевое значение).

При проведении этих расчетов значение параметра  $k$  кривой восстановления электрической прочности межконтактного промежутка ( $u_{\text{эл.пр.}}(t)=k(t+t_0)$ ) подбиралось таким образом, чтобы процесс отключения сопровождался лишь одним повторным зажиганием.

Таблица 1. Характеристики процесса отключения вакуумным выключателем (контактором)

Параметры	$i_0=5 \text{ А}$	$i_0=10 \text{ А}$
$k, \text{ кВ/мс}$	20	
$U_{\text{дв. max}} / U_{\text{ф. max}}$	4.6	4.8
Количество зажиганий	1	1

Как видно из табл. 1 уже при первом зажигании

дуги в выключателе при  $k=20 \text{ кВ/мс}$  максимумы перенапряжений превышают допустимые значения в диапазоне токов среза, равных или превышающих значение 5 А.

На рис. 4 приведена начальная часть процесса, сопровождающего отключение СД СМБО-630. Из рисунка видно, что процесс отключения сопровождается весьма большим количеством повторных зажиганий дуги в выключателе из-за высокой средней частоты колебаний, определяемой индуктивностью двигателя и емкостью кабеля.

Отключение двигателя, длина кабеля 25 м

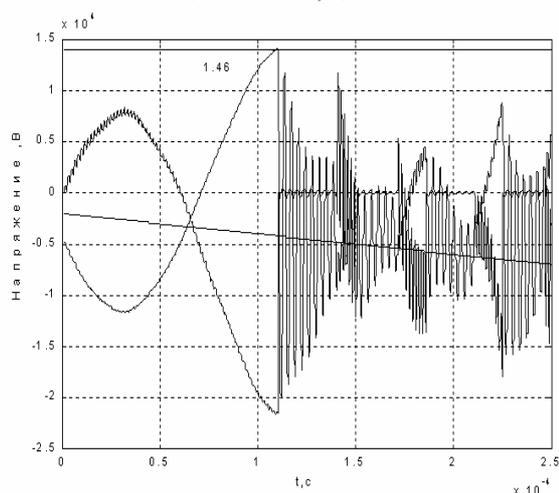


Рис. 4.

В табл. 2 приведены результаты расчета неограниченных перенапряжений для различных случаев включения электродвигателя.

Таблица 2. Максимальные кратности перенапряжений, возникающих при включении двигателей

Условия включения	Одновременное включение фаз	Включение фаз с разбросом
Включение заторможенного двигателя	1.9	3.2
Включение двигателя при $e_{\text{дв}} = -0.8u_c$	2.7	5.8
Включение двигателя при ОЗЗ в сети	2.8	3.1
Включение двигателя с замкнутой фазой	1.8	2.2

Из табл. 2 видно, что наибольшие кратности перенапряжений при включении двигателя, при прочих равных условиях, возникают при разбросе в действии полюсов выключателя. Кратности перенапряжений могут существенно превысить кратности, допустимые для статорной изоляции двигателя –  $3U_{\text{ф max}}$ .

**Несимметричное включение двигателя без защиты,  $f_{\alpha}=0.55 \text{ рад}$ ,  $e_{\alpha} = -0.8i_C$**

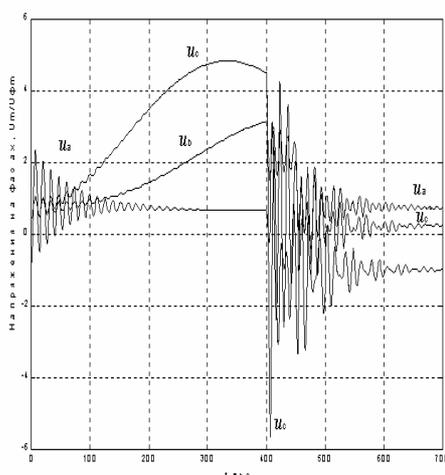


Рис. 5.

На рис. 6. приведена экспериментальная оциллограмма отключения пускового тока двигателя 6 кВ, 736 кВт, подключенного кабелем длиной 70 м, вакуумным выключателем с возникновением эскалации напряжения с кратностью 4.13 о.е. в первой отключаемой фазе выключателя [4].

**Экспериментальная оциллограмма отключения пускового тока двигателя**

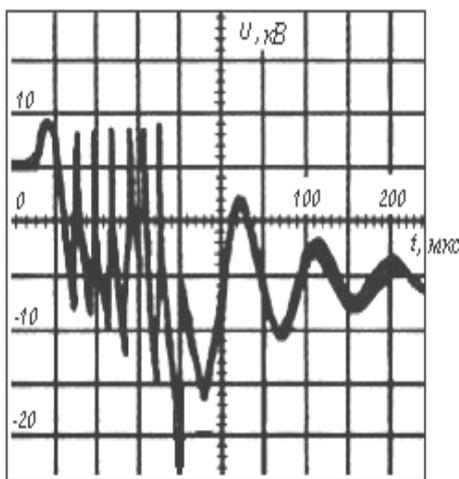


Рис. 6.

Данные оциллограммы хорошо согласуются с данными моделирования перенапряжений, возникающих при отключении двигателя (табл. 1).

**ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ RC-ЦЕПОЧЕК**

Наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений является правильно выбранная демпфирующая RC-цепочка. Она позволяет:

- уменьшить амплитуду перенапряжений при срезе тока, так как увеличивает емкость отключаемой нагрузки; при этом снижается также амплитуда восстанавливающегося после среза тока

- демпфировать высокочастотные колебания при повторных зажиганиях и в меньшей степени колебания после срезов тока;
- снизить частоту колебаний после среза тока, т.е. уменьшить частоту восстанавливающегося напряжения, чем снижает возможность повторных зажиганиях;
- сдвинуть нуль тока высокочастотных колебаний относительно максимума напряжения, поэтому в момент гашения при нуле тока напряжению на емкости ниже максимального; это снижает восстанавливающееся напряжение и возможность повторных зажиганиях;
- снизить крутизну фронта перенапряжений при повторных зажиганиях вследствие снижения частоты колебаний из-за увеличения емкости; это облегчает воздействия на продольную изоляцию.

**Отключение электродвигателя при оснащении присоединения RC-цепочкой**

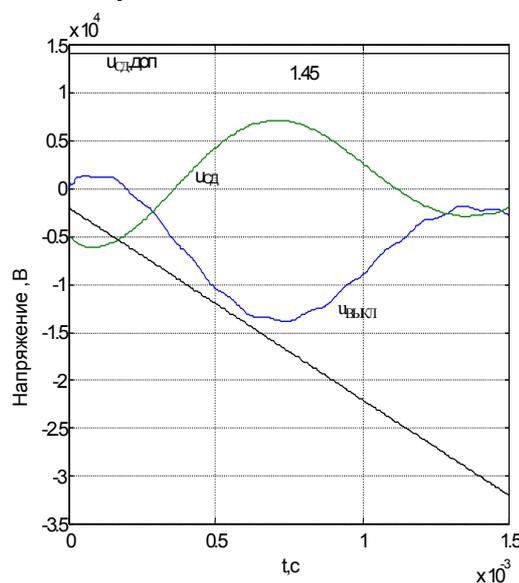


Рис. 6.

В табл. 3 приведены основные характеристики процесса отключения двигателя при наличии и отсутствии RC-цепочек. Влияние RC-цепочки на величины перенапряжений при несимметричном включении электродвигателя проиллюстрировано на рис. 7.

Таблица 3. Максимальные перенапряжения на двигателе СМБО-630 при его отключении вакуумным выключателем (контактором)

Характеристики процесса	Длина кабеля 25 м	
	$i_0=5\text{А}$ , $t_0=100 \text{ мкс}$ , $k=20 \text{ кВ/мкс}$	
	Неограниченные перенапряжения	RC-цепочка
Число повторных зажиганиях	более 5	0
$U_{\text{ов. max}} / U_{\text{ф max}}$	4.2-5.0	1.35

**Несимметричное включение двигателя с RC-цепочкой  $R=100$  Ом,  $C=0.15$  мкФ**

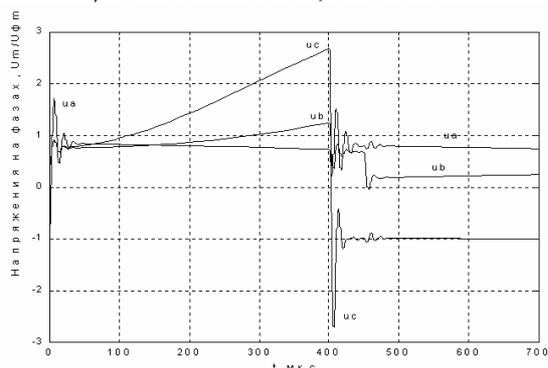


Рис. 7.

Таблица 4. Максимальные перенапряжения на электродвигателе СМБО-630 при его несимметричном включении

$U_{дв.маx} / U_{фмаx}$ , о.е.	
Без RC-цепочки	4.65
С RC-цепочкой ( $R=50$ Ом, $C=0.15$ мкФ)	2.21
С RC-цепочкой ( $R=100$ Ом, $C=0.15$ мкФ)	2.71
С RC-цепочкой ( $R=200$ Ом, $C=0.15$ мкФ)	3.24
С RC-цепочкой ( $R=300$ Ом, $C=0.15$ мкФ)	3.48
С RC-цепочкой ( $R=400$ Ом, $C=0.15$ мкФ)	3.62

В табл. 4. приведены величины перенапряжений при несимметричном включении двигателя.

Рис. 6, 7 и данные табл. 3, 4 наглядно демонстрируют эффективность применения RC-

цепочек для защиты двигателей от перенапряжений при различных коммутациях.

**ВЫВОДЫ**

1. Однофазные замыкания на землю опасны для сетей питания узлов нагрузки с синхронными двигателями. Релейная защита не способна отключить присоединение с замыканием на землю из-за недостаточной чувствительности и малых значений емкостного тока ОЗЗ.
2. Для предотвращения опасных дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений необходимо применять резистивное заземление нейтрали сети.
3. Если в сети нет элемента с нулевой точкой, дополнительное устройство, должно отвечать требованиям – максимально допустимая величина индуктивности нулевой последовательности  $L_0=2.5$  Гн.
4. Из двух рассмотренных вариантов защит более предпочтителен Первый вариант, так как он не связан с коммутациями включения/отключения.
5. Все случаи внезапного изменения режима (ОДЗ) и коммутации СД приводят к перенапряжениям, опасным для его статорной изоляции. Следовательно, для надежной эксплуатации двигателя необходимо его оснащение защитными аппаратами.
6. Наиболее простым способом, с точки зрения практической реализации, и наиболее надежным, - в плане защиты от перенапряжений при всех видах коммутаций являются защитные RC-цепочки.

[1]. Виштибеев В.И., Виштибеев А.В. Комплексная защита двигателей электропривода лебедки буровой установки "Уралмаш-3500" // Энергетика Тюменского региона, №3, Сентябрь, 2003. С. 26-34.

[2]. Виштибеев А.В., Емельянов Н.И., Сарин Л.И., Ильиных М.В. О длительности работы резистора для заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ. Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции. Новосибирск, 2002. С. 78-80.

[3]. Виштибеев А.В. Допустимое время существования однофазного замыкания на землю в сетях 6-35 кВ // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния // Труды международной научно-технической конференции, том 2 (15-19 сентября, 2003, Новосибирск, Россия). – Новосибирск: СИБНИИЭ, 2003. – 400 с. С. 134-141.

[4]. Colombo E., Costa G., Piccarreta L. Results of an investigation on the overvoltages due to a vacuum circuit-breaker when switching an H.V. Motor // IEEE Transactions on power delivery. - 1988. - №1. - Vol. 3. - pp. 205-213.