



## МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ТРЕХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.И. Федотов, Р.Э. Абдуллазянов, Р.М. Мударисов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Ramil.mudarisov@litsey7.com

**Резюме:** В статье показаны основные выводы, полученные при исследовании устойчивости синхронных двигателей при кратковременных нарушениях электроснабжения, обусловленных трехфазными короткими замыканиями в системах внешнего электроснабжения. Анализ работ, выполненных по данной тематике, выявил следующие их недостатки: не учитывается закон изменения напряжения на шинах двигателя, обусловленный возникшим замыканием; не учитывается зависимость напряжения на шинах двигателя от распределения токов в элементах системы электроснабжения; не учитывается воздействие нарушения на двигатель через его систему возбуждения. В рамках работы рассмотрены короткие замыкания в смежных линиях и выявлен закон изменения напряжения на шинах распределительного устройства подстанции во время замыкания. Для учета влияния указанных пренебрежений (недостатков) на устойчивость двигателя составлена модель синхронного двигателя и показаны условия ее применения. На основе проведенных исследований с использованием разработанной модели обоснованы методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системах внешнего электроснабжения. Результаты исследования могут быть использованы для настройки устройств релейной защиты систем электроснабжения с синхронными двигателями.

**Ключевые слова:** кратковременное нарушение электроснабжения, короткое замыкание, устойчивость, синхронный двигатель, допустимая длительность нарушения, методика.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии № 075-02-2018-190 – 1 этап, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57418X0188.

## SYNCHRONOUS MOTORS STABILITY ESTIMATION METHODOLOGIES UNDER THREE-PHASE FAULTS IN POWER SUPPLY GRIDS

A.I. Fedotov, R.E. Abdullazyanov, R.M. Mudarisov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Ramil.mudarisov@litsey7.com

**Abstract:** This article presents the three phase short circuit impact on synchronous motors stability research results. The analysis of the researches done in this field shows that they neglect

*following features in motor operation: the voltage sag form occurred during short circuit; dependency of voltage on the motor busbars from the currents passing in the power supply grid elements; the impact of sag through excitation system. Research conducts the voltage sag form equation for the three phase short circuits occurring in the adjacent electric lines. Synchronous motor model was developed to account the impact of neglected factors on the motor stability. Finally, article proposes the methodology developed to assess synchronous motor stability under three-phase short circuit faults occurring in power grids. Research results could be used to calibrate protective relays used in power supply grids with powerful synchronous motors.*

**Keywords:** Short-break power supply; short circuit; stability; synchronous motor; critical fault duration; methodology.

**Acknowledgments:** This research was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation as a part of federal targeted programme “Research and Development in Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014-2020”. Grant subsidy) agreement № 075-02-2018-190 – 1 stage, unique ID of applied scientific research (project) RFMEFI57418X0188.

**For citation:** Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E., Mudarisov R.M. Synchronous motors stability estimation methodologies under three-phase faults in power supply grids. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):90-99. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-90-99.

Обеспечение устойчивой работы приводов при кратковременных нарушениях электроснабжения (КНЭ) является одной из ключевых задач в системах электроснабжения с синхронными двигателями (СД). Данная задача решается внедрением и правильной настройкой уставок устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) и релейной защиты линий электропередач (ЛЭП), которые обеспечивают восстановление нормального электроснабжения до потери двигателями синхронизма [1, 2].

В обоих случаях требуется обоснование технических критериев (методик) оценки допустимой длительности КНЭ, под которой понимается наибольшая длительность КНЭ при которой двигатели еще сохраняют свою устойчивость.

Существующие практические критерии и методы оценки устойчивости [3, 4], а также отдельные исследования, которые проводятся в области оценки допустимой (критической) длительности нарушения двигателя при КЗ, основываются на оценке устойчивости двигателя со следующими допущениями (недостатками): при полном отключении питания и последующем его восстановлении [1, 2, 5]; без учета переходной составляющей остаточного напряжения [6–9]; без учета зависимости напряжения на шинах двигателя от распределения токов по элементам системы электроснабжения [7, 10]; без учета влияния КНЭ на двигатель через его систему возбуждения [6–9, 11].

В действительности, одной из главных причин КНЭ являются короткие замыкания (КЗ), возникающие в смежных ЛЭП [12]. При этом все вышесказанные допущения влияют на определении достоверной длительности нарушения питания, так как после возникновения замыкания двигатель непродолжительное время работает в условиях провала напряжения с переходной составляющей, к тому же напряжение на шинах СД зависит от падения напряжения в сопротивлениях элементов системы электроснабжения. Заметим, что большая часть мощных СД оборудована статическими системами возбуждения (СВ), которые получают питания от шин промышленной подстанции, откуда следует, что КНЭ влияет на устойчивость двигателя и через его систему возбуждения.

На рис. 1 приведена принципиальная схема электроснабжения СД. Где: ИП – источник питания (система); Л11 и Л12 – участки питающей линии; Т1 – понижающий трансформатор промышленной подстанции с СД; Л2 – смежная линия; РУ-1 распределительное устройство подстанции энергосистемы; РУ-2 – распределительное устройство промышленной подстанции.

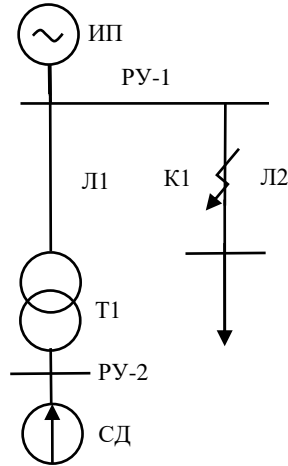


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения СД

Рассмотрим трехфазное КЗ в смежной ЛЭП (точка К1 на рис. 1) для схемы электроснабжения, в которой состав высоковольтной двигательной нагрузки (СД на рис. 1) не превышает 25–30% мощности трансформатора ввода (Т1 на рис. 1). Согласно ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках» при расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ допускается не учитывать синхронные электродвигатели, если они отделены от точки КЗ силовыми трансформаторами. Поэтому при трехфазном замыкании, возникающем в смежной ЛЭП (точка К1 на рис. 1), мгновенные значения периодической составляющей тока подпитки КЗ и напряжения одной из фаз на шинах РУ-1 подстанции энергосистемы соответственно имеют вид:

$$i_{\Pi}(t) = \frac{E\sqrt{2}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K)}{\sqrt{3}\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \sqrt{2}I_{\Pi}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K); \quad (1)$$

$$u_{\Pi}(t) = \frac{E\sqrt{2}\sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_1)}{\sqrt{3}\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \sqrt{2}U_{\Pi}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_1). \quad (2)$$

Апериодические составляющие тока и напряжения на шинах РУ-1, возникающие при КЗ, определим по выражениям:

$$i_A(t) = Ae^{-t/T}, \quad (3)$$

$$u_A(t) = (R_2 i_A(t) + \frac{X_2}{\omega} \frac{di_A(t)}{dt}) = (R_2 - \frac{X_2}{\omega T}) Ae^{-t/T}. \quad (4)$$

В выражениях (1–4):  $R_1$ ,  $X_1$  и  $R_2$ ,  $X_2$  – активные и реактивные сопротивления источника питания (энергосистемы) и участка аварийной ЛЭП соответственно;  $E$  – ЭДС энергосистемы;  $T$  – постоянная затухания аperiodической составляющей;  $\omega$  – циклическая частота напряжения системы;  $\alpha$  – фаза включения КЗ;  $\varphi_1$  и  $\varphi_K$  – фазовые углы, определяемые параметрами схемы замещения;  $A$  – модуль начального значения

апериодической составляющей тока КЗ. Величину  $A$  определим как разность мгновенных значений тока в момент, предшествующий КЗ, и периодической составляющей тока в начальный момент КЗ:

$$A = I_M \sin(\alpha - \varphi) - \sqrt{2} I_{\Pi} \sin(\alpha - \varphi_K). \quad (5)$$

В выражении (5):  $I_M$  – амплитуда периодической составляющей тока до КЗ;  $\varphi$  – фазовый угол периодической составляющей тока до КЗ. Из выражения (5) следует, что апериодическая составляющая тока и напряжения достигают своего наибольшего значения, если в предшествующем КЗ режиме на смежной линии отсутствует нагрузка. Перепишем выражение для апериодической составляющей напряжения на шинах РУ-1 (4) с учетом выражения (5):

$$u_A(t) = -\left(R_2 - \frac{X_2}{\omega T}\right) (\sqrt{2} I_{\Pi} \sin(\alpha - \varphi_K)) e^{-t/T} = -U_A e^{-t/T}. \quad (6)$$

Тогда остаточное напряжение на шинах РУ-1 при КЗ в смежной линии будет иметь вид выражения, содержащего периодическую ( $U_{\Pi}$ ) и апериодическую составляющие ( $U_A$ ):

$$U_{\text{ост}}(t) = \sqrt{2} U_{\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) - U_A e^{-t/T}. \quad (7)$$

На рис. 2, 3 и в табл. 1 показаны зависимости начальной величины апериодической составляющей остаточного напряжения ( $U_A^*$ ), фазовых углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_K$ , соответственно, от периодической составляющей остаточного напряжения ( $U_{\Pi}^*$ ) для шести значений постоянной времени затухания  $T^* = (1, 2, 3, 4, 5 \text{ и } 10)$  о.е. Данные результаты получены для сетей напряжением 110–220 кВ с токами трехфазного КЗ на шинах районной подстанции 4–40 кА. Из зависимостей рис. 2, 3 следует, что для рассматриваемых классов систем электроснабжения апериодическая составляющая напряжения тем больше, чем глубже провал напряжения и чем меньше постоянная времени затухания.

Таблица 1

| Зависимости фазового угла $\varphi_K$ от постоянной затухания $T^*$ |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|
| $T^*$ , о.е.  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 10 |
| $\varphi_K$ , °   | 81 | 85 | 87 | 88 | 88 | 89 |

Для оценки устойчивости синхронного двигателя составлена его численная модель, показанная на рис. 4. Отличием составленной модели от аналогичных моделей является то, что она учитывает особенности работы двигателя в условиях трехфазных КЗ, возникающих в смежных ЛЭП: закон изменения напряжения при КЗ согласно выражению (7), зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы внешнего электроснабжения и воздействие КНЭ на двигатель через его СВ.

Для учета воздействия КНЭ на двигатель через его систему возбуждения в модель (рис. 4) включены элементы типовой системы возбуждения ТЕ8-320 (*Excitation System*), реализующие ее основные функции и режимы работы в условиях КНЭ, а именно: форсировку возбуждения при понижении напряжения, включение цепи пускового сопротивления для ограничения перенапряжения на выпрямителе и пропуск зажигания тиристоров для отключения цепи пускового сопротивления.

Оценим условия применения практических критериев и упрощенных моделей СД, применяемых для оценки устойчивости СД при КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ, на примере двигателя СТД-8000 со следующими характеристиками рабочего режима: приведенный момент инерции механизма  $J_{\text{МЭХ}} = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , коэффициент загрузки  $m_c = 0,7$  о.е., рабочее напряжение системы до КЗ  $U = 0,997$  о.е. (на шинах СД  $U_{\text{СД}} = 1,081$  о.е.),

синхронная ЭДС до КЗ  $E_d=1,598$  о.е., угол нагрузки  $\delta=62,8^\circ$ . Двигатель получает питание от системы 110 кВ ( $Z_1=j15,88$  Ом) через трансформатор ТДН-16000/110, подключенный непосредственно к шинам подстанции энергосистемы.

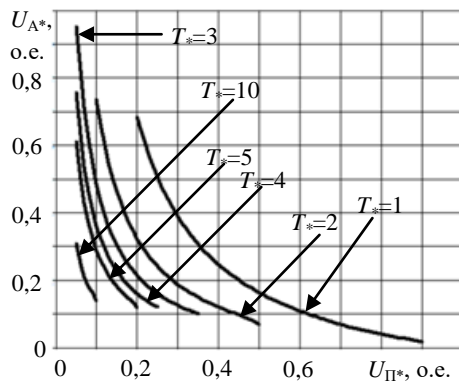


Рис. 2. Зависимости аperiodической составляющей ( $U_{A*}$ ) от периодической составляющей ( $U_{П*}$ )

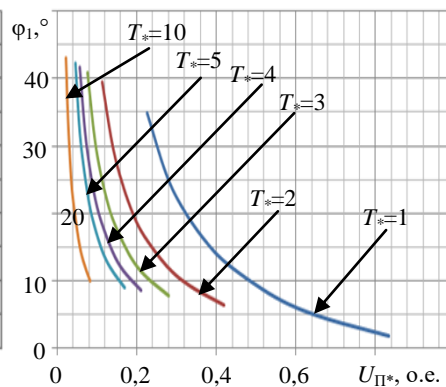


Рис. 3. Зависимости угла  $\phi_1$  от напряжения  $U_{П*}$  при учете аperiodической составляющей  $U_{A*}$

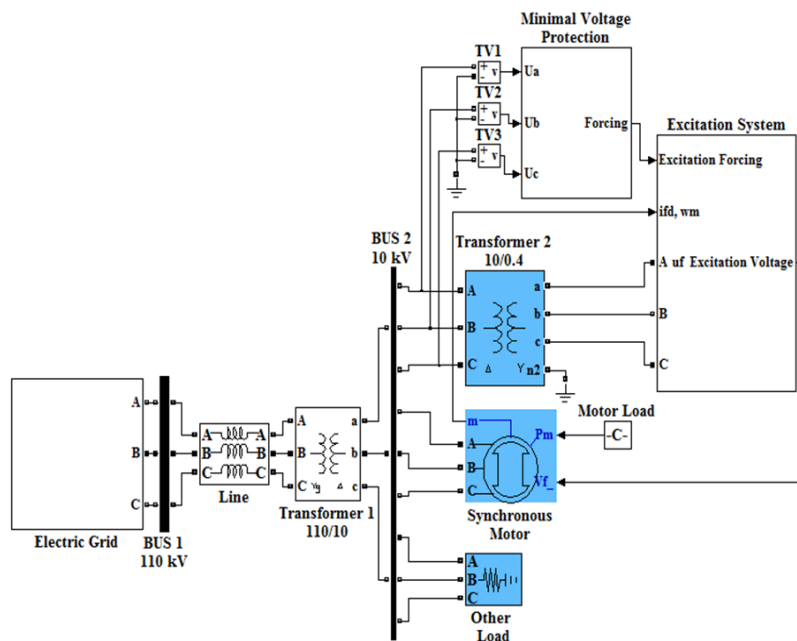


Рис.4. Блок - схема модели СД и его системы электроснабжения

В табл. 2 приведены результаты исследования допустимой длительности КНЭ, обусловленного трехфазными КЗ в смежных линиях, полученные на упрощенных моделях.

В табл. 2:

- 1) тестовая модель, которая является полной моделью системы электроснабжения, показанной на рис. 1 и учитывающей систему ИП, питающую линию Л1, понижающий трансформатор Т1, двигатель СД, систему возбуждения двигателя, смежную линию Л2 и блок трехфазного КЗ в смежной линии;
- 2) модель 1 – разработанная модель, которая вместо системы и блока трехфазного замыкания в смежной линии учитывает закон изменения остаточного напряжения на шинах РУ-1 согласно выражению (7), но при этом учитывает остальные элементы системы электроснабжения (Л1, Т1, двигатель, СВ);
- 3) модель 2 аналогична модели 1, но не учитывает аperiodическую составляющую остаточного напряжения;
- 4) модель 3 не учитывает аperiodическую составляющую остаточного напряжения и воздействия КНЭ на СВ;
- 5) модель 4 не учитывает аperiodическую составляющую остаточного напряжения, воздействия КНЭ на СВ, а также элементы системы электроснабжения, соответственно и влияния распределения токов в ней на напряжение СД.

Таблица 2

| Оценка устойчивости на численных моделях                               |                      |  |              |  |              |   |              |   |              |  |
|--|----------------------|--|--------------|--|--------------|---|--------------|---|--------------|--|
| Параметры остаточного напряжения ( $U_{П*}$ , $U_{А*}$ , $T_*$ , о.е.) |                      | Опыт 1: $U_{П*}=0$ , $U_{А*}=0$ , $T_*=0$ (КЗ на шинах РУ-1 энергосистемы) |              | Опыт 2: $U_{П*}=0,111$ , $U_{А*}=0,256$ , $T_*=5$ ( $U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-240 $L=4,678$ км) |              | Опыт 3: $U_{П*}=0,227$ , $U_{А*}=0,579$ , $T_*=1$ ( $U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-70 $L=7,077$ км) |              | Опыт 4: $U_{П*}=0,431$ , $U_{А*}=0,217$ , $T_*=1$ ( $U=110$ кВ, КЗ на ЛЭП АС-185 $L=26,276$ км) |              | Суммарная погрешность по всем проверкам $\Delta_c$ , % |
| №  | Вид численной модели | $t_d$ , мс   | $\Delta$ , % | $t_d$ , мс   | $\Delta$ , % | $t_d$ , мс  | $\Delta$ , % | $t_d$ , мс  | $\Delta$ , % |  |
| 1  | Тестовая модель      | 160  | 0,0          | 211  | 0,0          | 231   | 0,0          | 831   | 0,0          | 0,0  |
| 2  | Модель 1             | 172  | 7,5          | 215  | 1,9          | 232   | 0,4          | 932   | 12,2         | 22,0   |
| 3  | Модель 2             | 172  | 7,5          | 206  | 2,4          | 217   | 6,1          | 698   | 16,0         | 31,9   |
| 4  | Модель 3             | 178  | 11,3         | 210  | 0,5          | 223   | 3,5          | 933   | 12,3         | 27,5   |
| 5  | Модель 4             | 245  | 53,1         | 314  | 48,8         | 124<br>9  | 440,<br>7    | 393<br>4  | 373,<br>4    | 916,<br>0  |

Результаты показывают, что достоверная оценка устойчивости СД во всем диапазоне провалов напряжения возможна только в полной модели (тестовая модель в табл. 2), а также в моделях, которые учитывают: закономерность изменения остаточного напряжения; зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы электроснабжения и воздействия КНЭ на двигатель через СВ (модель 1 в табл. 2). Однако разработанная модель обладает рядом преимуществ, а именно: позволяет сократить количество учитываемых элементов, смежных с системой электроснабжения двигателя, что уменьшает время составления и настройки модели СД и его системы электроснабжения, а также время поиска параметров такого КЗ (удаленность, марка провода, нагрузка смежных участков), при котором возникает режим с наименьшей

допустимой длительностью КНЭ при заданном значении периодической составляющей остаточного напряжения.

В табл. 3 приведены результаты расчета допустимой длительности КНЭ по практическим критериям (метод равных площадей, критерий динамической устойчивости при перерывах питания) [3, 4]. Данные результаты получены с учетом тормозного момента от тока возбуждения ( $m_T$ ) и форсировки возбуждения ( $E_q=1,75E_{q,ном}=4,0$  о.е.). Для проведения расчета устойчивости использованы параметры КНЭ, соответствующие опытам 3 и 4 в табл. 2 (в опыте 3  $U_{П*}=0,227$  о.е., в опыте 4  $U_{П*}=0,431$  о.е.).

Результаты показывают, что приведенные критерии устойчивости не обеспечивают необходимой точности в определении допустимой длительности КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ в системах внешнего электроснабжения во всем диапазоне провалов напряжения. Рассмотрим особенности оценки устойчивости СД на численной модели, учитывающей полученные выше рекомендации.

Таблица 3

| Оценка устойчивости СД по практическим критериям |                                 |                 |                 |   |                                |                           |
|--|---------------------------------|-----------------|-----------------|---|--------------------------------|---------------------------|
| Критерий   | Метод равных площадей $t_d$ , с |                 |                 | Устойчивость при перерывах питания $t_{кр}$ , с |                                |                           |
| Принимаемые допущения                            | $E_q=const$                     | $E'_q=const$    | $E''_q=const$   | $m_T=0$<br>$E_q=E_{q1}$                         | $m_T \neq 0$ ,<br>$E_q=4$ о.е. | $m_T=0$ ,<br>$E_q=4$ о.е. |
| Доп. длительность в опыте № 3/4, с               | 0,151/<br>0,209                 | 0,233/<br>0,095 | 0,083/<br>0,047 | 0,232/<br>0,232                                 | 0,213/<br>0,213                | 0,292/<br>0,292           |
| Погрешность в опыте 3/4, %                       | 34,6/74,8                       | 0,9/88,6        | 64,1/94,3       | 0,4/72,1  | 7,8/74,4                       | 26,4/64,9                 |

На рис. 5 показаны зависимости допустимой длительности КНЭ от момента возникновения КЗ, который определяется углом  $\alpha$  в выражении (7). Данные результаты получены на численном примере двигателя СТД-8000, работающего при описанных выше условиях предаварийного режима и характеристиками КЗ опыта № 3 (табл. 2). На рис. 5 зависимость  $L_1$  соответствует результатам, полученным на полной модели, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110);  $L_2$  – результатам, полученным на полной модели, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию (АС-70 длиной 20 км);  $L_3$  – результатам, полученным на модели без учета аperiodической составляющей остаточного напряжения, когда двигатель получает питание через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию (АС-70 длиной 20 км).

Из результатов (рис. 5) следует, что разница между максимальной и минимальной допустимой длительностью КНЭ составляет менее 2 % (порядка 3 мс), что позволяет не учитывать момент возникновения КЗ с наиболее тяжелыми условиями работы двигателя.

На рис. 6 показана зависимость допустимой длительности КНЭ от глубины провала напряжения, полученная на численной модели двигателя СТД-8000, который получает питание от системы 110 кВ через трансформатор (ТДН-16000/110) и питающую линию длиной 20 км (АС-70). До КНЭ двигатель работает со следующими характеристиками:  $U=0,995$  о.е. ( $U_{CD}=1,07$  о.е.),  $E_q=1,587$  о.е.,  $\delta=64,8^\circ$ . На рис. 6: линия  $T_0$  соответствует режиму без аperiodической составляющей остаточного напряжения;  $T_i$  – режиму с аperiodической составляющей, постоянная затухания которой равна  $i$  о.е.

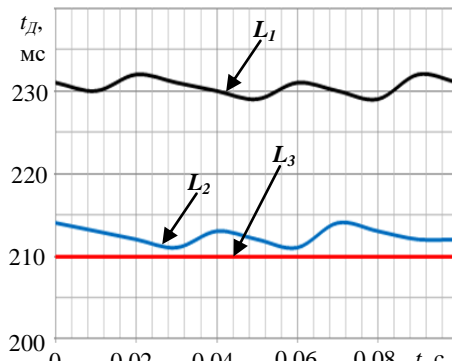


Рис. 5. Допустимая длительность КНЭ

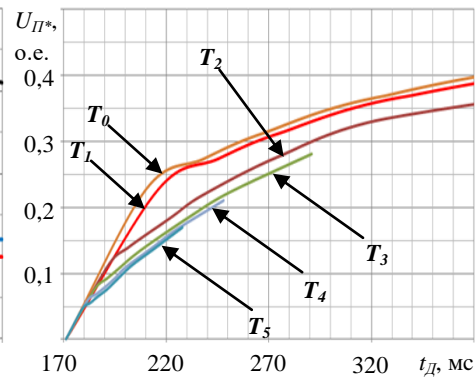


Рис. 6. Области устойчивости СД

Данные результаты показывают, что учет и увеличение постоянной затухания аperiodической составляющей напряжения приводит к увеличению допустимой длительности КНЭ. Соответственно оценка устойчивости при КНЭ без переходной составляющей остаточного напряжения позволяют получить универсальную область устойчивости, включающую области устойчивости, соответствующие всем возможным постоянным затухания переходной составляющей.

На рис. 7 показаны зависимости допустимой длительности КНЭ от значения фазового угла  $\varphi_1$  без учета аperiodической составляющей остаточного напряжения. Численное исследование проведено для двигателя СТД-8000 с параметрами рабочего режима, которые были использованы для построения зависимостей на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что допустимая длительность КНЭ в условиях одного и того же значения периодической составляющей остаточного напряжения, но при различных значениях угла  $\varphi_1$ , может различаться до 36 %. Заметим, что действительное значение угла  $\varphi_1$  определяется параметрами сети и находится в диапазоне от 0 до 90 ° и что увеличение этого угла приводит к увеличению допустимой длительности КНЭ. Следовательно, определение допустимой длительности КНЭ необходимо производить для меньшего значения фазового угла  $\varphi_1$ .

На рис. 8 показаны зависимости значения фазового угла  $\varphi_1$  от периодической составляющей остаточного напряжения для различных марок провода ЛЭП и сопротивлений энергосистем напряжением 110–220 кВ. Данные зависимости построены для систем, токи трехфазного КЗ которых находятся в диапазоне 4–40 кА. На рис. 7: линия  $L_1$  – соответствует проводу марки АС-70 при напряжении 110 кВ;  $L_2$  – АС-95 при 110 кВ;  $L_3$  – АС-150 при 110 кВ;  $L_4$  – АС-300 при 110 кВ;  $L_5$  – АС-300 при 220 кВ;  $L_6$  – АС-400 при 220 кВ. Учитывая выводы, сделанные по рис. 6, можно заключить, что оценка устойчивости СД во всем диапазоне значений остаточного напряжения должна производиться для значений фазового угла  $\varphi_1$ , соответствующего ЛЭП с большим сечением провода.



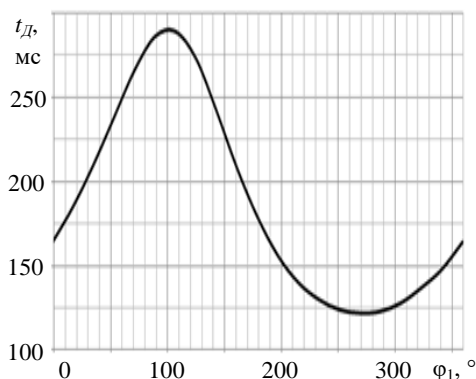


Рис. 7. Зависимость допустимой длительности от угла  $\phi_1$

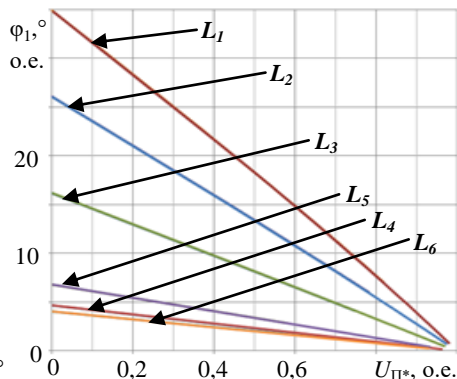


Рис. 8. Зависимости угла  $\phi_1$  от периодической составляющей  $U_{\Pi^*}$

Полученные результаты являются основой методики оценки динамической устойчивости СД при КНЭ, обусловленных трехфазными КЗ в системе внешнего электроснабжения, которая реализуется следующими принципами:

1) численная модель СД должна учитывать закономерность изменения остаточного напряжения при КЗ согласно выражению (7), зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах системы электроснабжения и воздействие КНЭ на двигатель через его СВ (модель 1 в табл. 2 и на рис.4);

2) оценку устойчивости во всем диапазоне значений остаточного напряжения и возможных значений постоянной затухания целесообразно производить на основе универсальной области устойчивости (рис. 6), которая строится по значения допустимой длительности КНЭ, полученным в разработанной численной модели СД (рис. 4), при провалах напряжения, описываемых выражением (7) без апериодической составляющей;

3) допускается пренебрегать влиянием момента возникновения замыкания (угол  $\alpha$  в выражении (7)) на допустимую длительность нарушения питания;

4) при оценке устойчивости значения фазовых углов  $\phi_1$  в выражении (7) необходимо выбирать согласно рис. 8 исходя из величины периодической составляющей остаточного напряжения ( $U_{\Pi}$ ) и для большего сечения провода смежных линии, подключенных к шинам районной подстанции энергосистемы.

Применение методики целесообразно при выборе и настройке устройств релейной защиты и автоматики, а также при выборе элементов системы электроснабжения по условиям устойчивости двигателей, что позволит повысить надежность функционирования СД при КНЭ в составе систем электроснабжения.

#### Литература

- 1.Пупин В.М., Жуков В.А., Сафонов Д.О. Модернизации схемы включения элегазового выключателя для обеспечения неотключений погружных насосов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2013. №1. С. 56–60.
- 2.Алексеев В.Ю. Защита от потери питания на перекачивающих насосных станциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Уфа, 2012.
- 3.Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
- 4.Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. М: Высш. шк., 1985. 536 с.
- 5.Шабанов В.А., Юсупов Р.З., Алексеев В.Ю. Устройство адаптивного автоматического включения резерва на нефтеперекачивающих станциях // Электротехнические комплексы и системы. Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, №2. С. 16–22.

6. Marini P. Immunity to voltage dips for synchronous motors // Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada: 2013.

7. Hyla M. Impact of voltage dips on the operations of a high-power synchronous motor with a reactive power controller // Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering. 2016. N2. P. 5–13.

8. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Плотников И.Г. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи // Нефтегазовое дело. 2011. №3. С. 17–25.

9. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation // Energy and Power Engineering. 2012. N4. P. 117–124. DOI:10.4236/epe.2012.43016.

10. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E // European Power Electronics and Drives Journal (EPE). 2005. Vol. 15, no 4. P. 35–42.

11. Alipoor J., Doroudi A., Hosseini S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 13, N 42.

12. Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э., Вагапов Г.В., Роженцова Н.В. Методика проверки эффективности токоограничивающего устройства для снижения глубины провала напряжения // Промышленная энергетика. 2016. №12. С. 28–33.

#### Авторы публикации

**Федотов Александр Иванович** – д-р техн. наук, профессор, Инжиниринговый центр "Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения" Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Абдуллазянов Рустем Эдвардович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматика» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Мударисов Рамиль Миннесалихович** – соискатель, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

#### References

1. Pupin V.M., Zhukov V.A., Safonov D.O. Modernization of the scheme of inclusion gas-insulated switch for maintenance not switching-off of submersible pumps // Scientific-educational and applied journal. University news, north-caucasian region, technical sciences series. 2013. №1. P. 56–60.

2. Alekseev V.Yu. Power loss protection of oil pumping stations: Ph.D. (candidate) thesis in Engineering Science: 05.09.03. Ufa, 2012.

3. Golodnov Yu.M. Re-acceleration (self-synchronization) of electric motors. M.: Energoatomizdat publishing house, 1985. 136 p.

4. Venikov V.A. Electromechanical transient phenomena in electrical power systems. M.: High school publishing house, 1985. 536 p.

5. Shabanov V.A., Yusupov R.Z., Alekseev V.Yu. Device for adaptive automatic to reserve source on oil pumping stations. Electrical facilities and systems. Electrical and data processing facilities and systems. 2016. V. 12, N 2. P. 16–22.

6. Marini P. Immunity to voltage dips for synchronous motors // Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada: 2013.

7. Hyla M. Impact of voltage dips on the operations of a high-power synchronous motor with a reactive power controller // Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering. 2016. N2. P. 5–13.

8. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Plotnikov I.G. The dynamic stability of electrotechnical complexes with synchronous and asynchronous motors in oil and gas enterprises. // Digital Scientific magazine «Oil and Gas Engineering». 2011. N 3. P. 17–25.

9. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation // Energy and Power Engineering. 2012. N 4. P. 117–124. DOI:10.4236/epe.2012.43016.

10. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E // European Power Electronics and Drives Journal (EPE). 2005. Vol. 15, N 4. P. 35–42.

11. Alipoor J., Doroudi A., Hosseinian S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 13, N 42.

12. Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E. Vagapov G.V., Rozhentsova N.V. Effectiveness assessment methodology of voltage dip mitigation by current-limiting device // Industrial Power Engineering. 2016. №12. P. 28–33.

#### **Authors of the publication**

*Alexander I. Fedotov* – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

*Rustem E. Abdullazyanov* – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

*Ramil M. Mudarisov* – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

*Поступила в редакцию*

*10 марта 2019 г.*