

УДК 622.276.53.054.23:621.67-83

## ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С СИНХРОННЫМИ И АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕДОБЫЧИ

Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Плотников И.Г.

*Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), г. Санкт-Петербург  
e-mail: bescheiden@rambler.ru*

**Аннотация.** *Существуют непрерывные технологические производственные процессы, нарушение электроснабжения которых даже на несколько миллисекунд приводит к значительному экономическому ущербу. Данная статья посвящена вопросам разработки методики определения границ динамической устойчивости электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями. Для выявления условий, при которых достигается непрерывность и устойчивость технологических процессов с потребителями электрической энергии, разработана обобщенная математическая модель, позволяющая выявить глубину и длительность провалов напряжения, и уровень их восстановления. В результате моделирования были выявлены зависимости, позволяющие определить предельно допустимую глубину провалов напряжения в системе электроснабжения и напряжение на выходе источников бесперебойного питания, при которых обеспечивается динамическая устойчивость технологического процесса на примере установок, в которых в качестве приводных механизмов используются синхронные и асинхронные двигатели.*

**Ключевые слова:** *непрерывность технологических процессов, динамическая устойчивость, электромеханический комплекс, потеря напряжения*

Основную часть потребителей электроэнергии на нефтепромыслах составляют электроприемники первой категории в отношении обеспечения надежности электроснабжения. Например, кустовые, дожимные, перекачивающие насосные станции и т.д. Перерыв электроснабжения данных электроприемников может повлечь значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса. В табл. 1 приведена информация по отключениям электрооборудования на объектах ОАО «Татнефть», связанным с нарушением электроснабжения, за 2007 и 2008 гг. Из таблицы видно, что общее количество отключений оборудования в год превышает тысячу. Согласно ПУЭ перерыв электроснабжения потребителей первой категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания. Данное время может достигать нескольких секунд. Однако, снижение уровня питающего напряжения ниже минимально допустимого, а также перерывы в электроснабжении длительностью свыше 0,15 с уже могут привести к расстройству сложных технологических процессов, ложным срабатываниям системы электросетевой автоматики и защиты, отказам в электроснабжении особой группы потребителей первой категории и значительному экономическому ущербу [1].

Таблица 1. Количество отключения электрооборудования на объектах ОАО «Татнефть»

Наименование	2007 г.	2008 г.	Разница
Пониженное напряжение	63	83	+20
Дисбаланс напряжений	184	179	-5
Нет питания с КТП	680	715	+35
Повышенное напряжение	89	144	+55
ВСЕГО	1016	1121	+105

Поэтому представляется актуальным определение условий обеспечения динамической устойчивости режимов электрооборудования, обеспечивающего непрерывный технологический цикл производства, в зависимости от глубины и длительности провалов напряжения и уровня его восстановления в сетях предприятий нефтедобычи. За критерий динамической устойчивости принята непрерывная и устойчивая работа синхронных (СД) и асинхронных (АД) электродвигателей, входящих в состав электромеханических комплексов и, как следствие, непрерывность и устойчивость технологических процессов предприятий нефтедобычи, при различной глубине и длительности провала напряжения и уровня его восстановления.

Для выявления условий, при которых достигается непрерывность и устойчивость технологических процессов с потребителями электрической энергии первой категории разработана обобщенная математическая модель, позволяющая выявить глубину и длительность провалов напряжения и уровень его восстановления из условия обеспечения динамической устойчивости электромеханических комплексов с СД и АД. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{d(i_d \cdot (x_\ell + x_s) + x_{ad} \cdot (i_f \cdot k + i_{kd} + i_d))}{dt} = \\
 & = 2\pi \cdot f \cdot \left( U_\delta \cdot \sin \Theta - (r + r_s) \cdot i_d + (i_q \cdot (x_\ell + x_s) + (x_{ad} \cdot (1 - b) + x_{aq} \cdot b) \cdot (i_q + i_{kq})) \cdot \omega \right); \\
 & \frac{d(i_q \cdot (x_\ell + x_s) + (x_{ad} \cdot (1 - b) + x_{aq} \cdot b) \cdot (i_q + i_{kq}))}{dt} = \\
 & = 2\pi \cdot f \cdot \left( U_\delta \cdot \cos \Theta - (r + r_s) \cdot i_q - (i_d \cdot (x_\ell + x_s) + x_{ad} \cdot (i_f \cdot k + i_{kd} + i_d)) \cdot \omega \right); \\
 & \frac{d(x_{ad} \cdot (i_d + i_{kd}) + x_f \cdot i_f \cdot k)}{dt} = 2\pi \cdot f \cdot k \cdot (U_f - r_f \cdot i_f); \\
 & \frac{d(x_{ad} \cdot (i_d + i_f \cdot k) + x_{kd} \cdot i_{kd})}{dt} = 2\pi \cdot f \cdot (-r_{kd} \cdot i_{kd}); \\
 & \frac{d((x_{ad} \cdot (1 - b) + x_{aq} \cdot b) \cdot i_q + (x_{kd} \cdot (1 - b) + x_{kq} \cdot b) \cdot i_{kq})}{dt} = 2\pi \cdot f \cdot (-i_{kq} \cdot (r_{kd} \cdot (1 - b) + r_{kq} \cdot b)); \\
 & \frac{d\omega}{dt} = \frac{(i_d \cdot (x_\ell + x_s) + x_{ad} \cdot (i_f \cdot k + i_{kd} + i_d)) \cdot i_q - (i_q \cdot (x_\ell + x_s) + (x_{ad} \cdot (1 - b) + x_{aq} \cdot b) \cdot (i_q + i_{kq})) \cdot i_d + M_c}{T_j}; \\
 & \frac{d\Theta}{dt} = 2\pi \cdot f \cdot (\omega - 1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий наличие обмотки возбуждения;  
 $b$  – коэффициент, характеризующий явнополюсность СД;  
индекс  $d$  относится к продольной оси,  $q$  – к поперечной оси,  $k$  – к обмотке ротора,  $f$  – к обмотке возбуждения,  $s$  – к сети;  
 $r$  – активное сопротивление;  
 $x$  – индуктивное сопротивление;  
 $i$  – ток;  
 $M_c$  – момент сопротивления;  
 $t$  – время процесса;  
 $\Theta$  – угол между продольными осями статора и ротора;  
 $x_\ell$  – индуктивное сопротивление рассеяния статора;  
 $U_\delta$  – напряжение двигателя.

При составлении данной системы уравнений за основу принята система уравнений Парка-Горева, описывающая электромагнитные и электромеханические процессы в электрических машинах, с учетом характеристик питающей сети, момента нагрузки и коэффициента использования [2, 3].

Все параметры в системе уравнений (1) представлены в относительных единицах (о.е.) (система равных взаимоиндуктивностей).

Полученная модель электромеханического комплекса позволяет, при определенном задании параметров  $k$  и  $b$ , оценить динамическую устойчивость электромеханических комплексов с СД и АД:

- при  $k = b = 1$  учитываются соответствующие параметры электропривода (ЭП) отдельно по осям « $d$ » и « $q$ », модель имитирует работу явнополюсного синхронного двигателя;

- при  $k = 1$ ;  $b = 0$  параметры ЭП заданы по оси « $d$ » равными параметрам по оси « $q$ », модель имитирует работу неявнополюсного синхронного двигателя;

- при  $k = b = 0$  отсутствует управляющее воздействие на параметры обмотки возбуждения, модель адекватна работе асинхронного двигателя.

Модель позволяет одновременно рассмотреть работу ЭП в генераторном и двигательном режимах, что необходимо при моделировании пуска, самозапуска, при возникновении короткого замыкания в сети и срабатывании устройства автоматического ввода резерва.

Блок-схема разработанной модели электромеханического комплекса с СД и АД, позволяющая выявить его поведение при кратковременных нарушениях электроснабжения, представлена на рис. 1.

Полученная модель позволяет установить характеристики УЭЦН и СД КНС при пусках, самозапусках, при возникновении короткого замыкания (КЗ) и срабатывании устройства автоматического ввода резерва (АВР).

Момент сопротивления  $M_c$  для УЭЦН определяется в соответствии со струйной теорией работы турбомашин из уравнения:

$$M_c = 0,05 M_{ном} + 0,95 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \left( \begin{aligned} & z_K \cdot A \cdot n \cdot \frac{z_K \cdot B \cdot n - \sqrt{(z_K \cdot B \cdot n)^2 + 4 \cdot (R_{тр} \cdot h_z - z_K \cdot C) \cdot (z_K \cdot A \cdot n^2 - h_z)}}{2 \cdot (i \cdot h_z - z_K \cdot C_2)} - \\ & - z_K \cdot B \cdot \left( \frac{z_K \cdot B \cdot n - \sqrt{(z_K \cdot B \cdot n)^2 + 4 \cdot (R_{тр} \cdot h_z - z_K \cdot C) \cdot (z_K \cdot A \cdot n^2 - h_z)}}{2 \cdot (R_{тр} \cdot h_z - z_K \cdot C)} \right)^2 + \\ & + z_K \cdot C \cdot n^2, \end{aligned} \right) \quad (2)$$

где номинальный момент  $M_{ном} = 30 \frac{P_{мех}}{\pi \cdot n_{ном}}$  при номинальных потребляемых мощностях  $P_{мех}$ , подаче  $q_{ном}$ , и частоте вращения насоса  $n_{ном}$ ;  $A, B, C$  – коэффициенты уравнений, описывающих индивидуальные характеристики ЭЦН;  $z_k = \frac{h'}{h_k}$  – число колес центробежного насоса, определяемое отношением предварительно рассчитанного напора развиваемого насосом ( $h'$ ) к напору на одну ступень  $h_k$ ;  $n$  – частота вращения ЭЦН;  $R_{тр}$  – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление насосно-компрессорного трубопровода;  $h_z$  – геодезическая высота подъема пластовой жидкости [4].

В результате моделирования выявлены зависимости допустимой глубины и длительности провалов напряжения и уровня его восстановления из условия обеспечения динамической устойчивости двигательной нагрузки.

На рис. 2 представлены зависимости допустимой потери напряжения  $\Delta U_d$ , при которой обеспечивается динамическая устойчивость УЭЦН независимо от продолжительности его существования, при различных глубинах подвески ( $L$ ) ПЭД и коэффициенте использования ( $k_u$ ).

Как следует из рис. 2, при  $k_u = 1$  и  $L = 1600$  м допустимая глубина провала напряжения составляет 0,2 о.е. За базис для  $\Delta U_{np}$  принято номинальное напряжение ПЭД. С уменьшением  $k_u$  и  $L$  допустимая величина  $\Delta U_{np}$  увеличивается и достигает 0,6 о.е. при  $k_u = 0,5$  и  $L = 600$  м.

На рис. 3 приведены зависимости допустимой глубины провалов напряжения ( $\Delta U_d$ ) от длительности и уровня его восстановления ( $U_в$ ) при коэффициенте использования  $k_u = 1$ .

Из рис. 3 следует, что при глубине подвеса ПЭД  $L = 1600$  м и  $k_u = 1$   $\Delta U_d = 0,3$  о.е. при длительности  $t_{np} = 0,18$  с и  $U_в = 0,8 U_{ном}$ . При  $L = 1000$  м и  $k_u = 1$   $\Delta U_d = 0,4$  о.е. при длительности  $t_{np} = 1,25$  с и  $U_в = 0,8 U_{ном}$ . Таким образом, с уменьшением глубины подвески ПЭД  $L$  и коэффициента использования загрузки ПЭД  $k_u$  увеличивается допустимая глубина и длительность провала напряжения, при которых обеспечивается непрерывность технологического процесса.

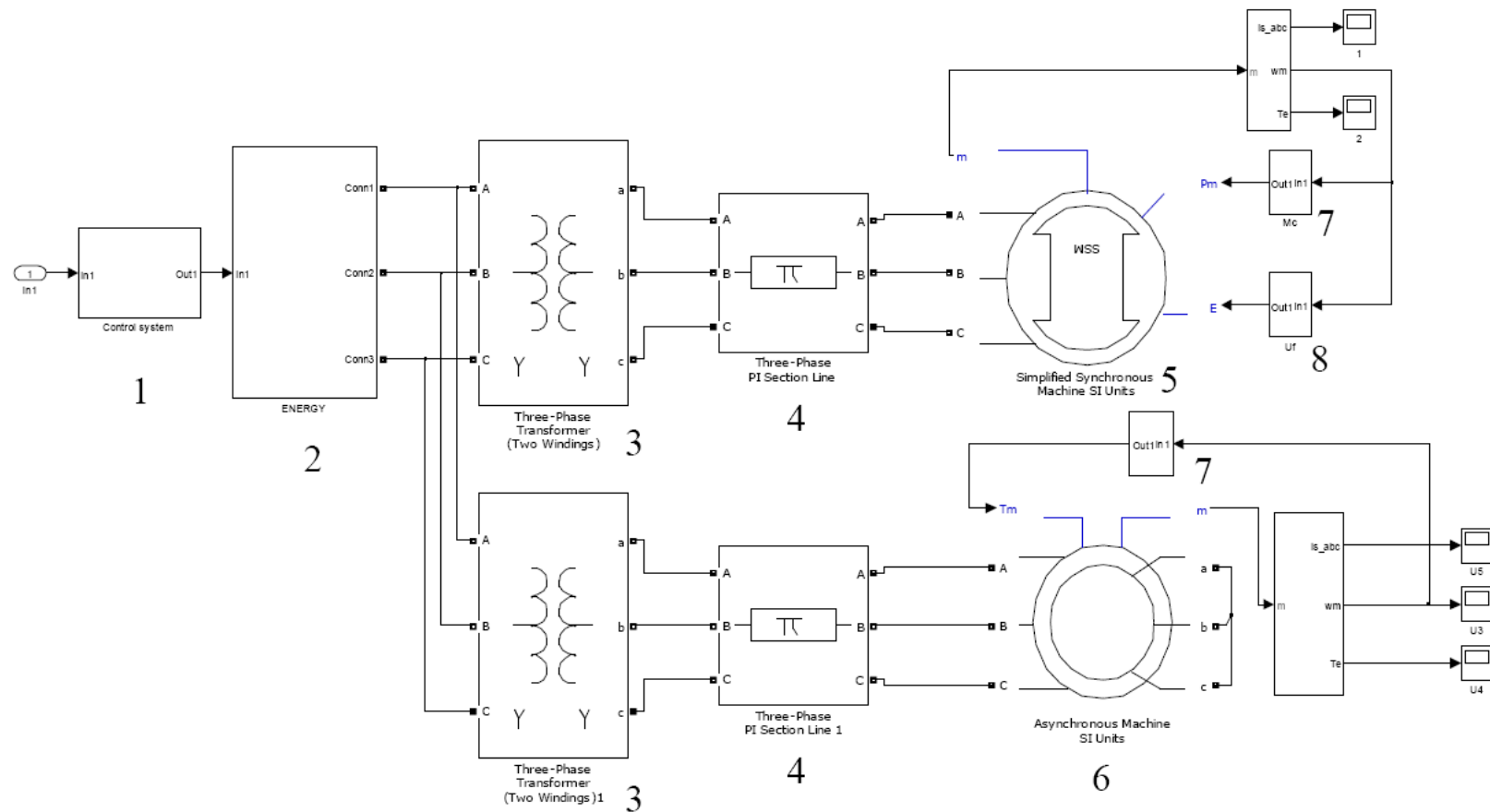


Рис. 1. Блок-схема модели электромеханического комплекса:

- 1 – блок, формирующий аварийные режимы в электрической сети;  
 2 – источник электроэнергии; 3 – трехфазный трансформатор; 4 – питающий кабель;  
 5 – синхронный двигатель кустовой насосной станции; 6 – погружной электродвигатель;  
 7 – нагрузка на валу электродвигателя; 8 – автоматический регулятор возбуждения

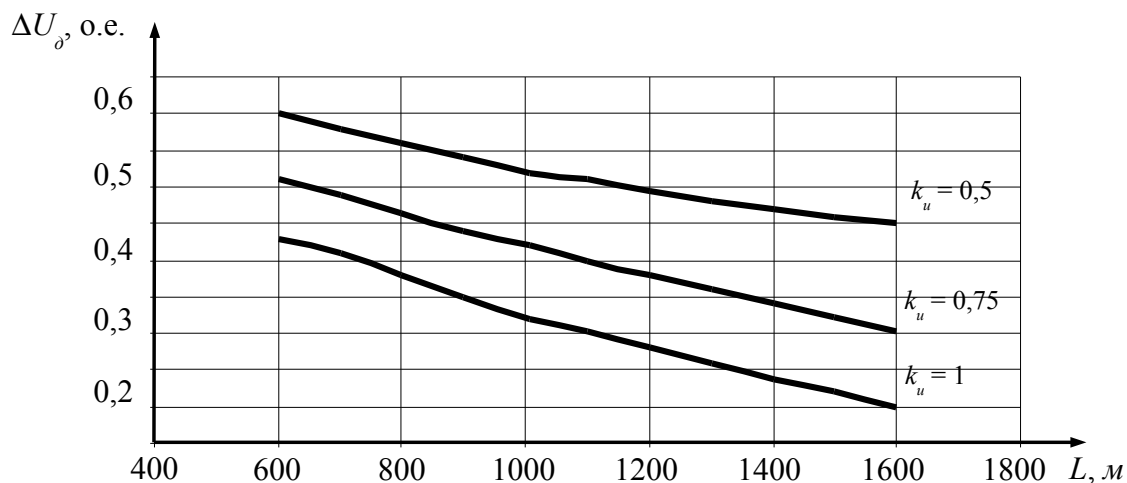


Рис. 2. Зависимости допустимой потери напряжения от глубины подвески и коэффициента использования ПЭД

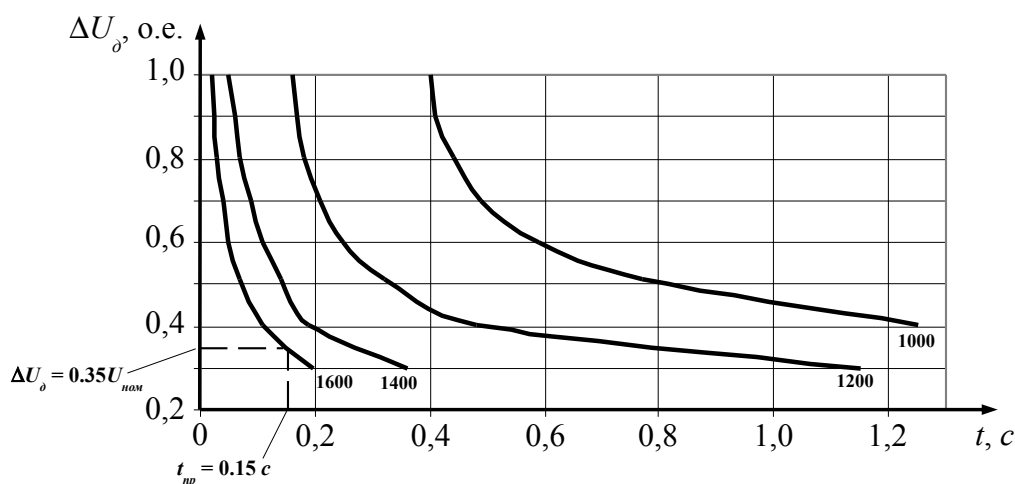


Рис. 3. Зависимость допустимой потери напряжения питания ПЭД от ее продолжительности при последующем восстановлении питания до  $U_\delta = 0,8U_{ном}$

Исследования, проведенные при уменьшении напряжения восстановления до  $U_\delta = 0,7U_{ном}$ , выявили, что предельная величина допустимой потери напряжения при  $L = 1000$  м и длительности существования провала 0,45 с составляет 0,4 о.е. Полученные зависимости позволяют определить предельно допустимую величину потери напряжения в системе электроснабжения УЭЦН и напряжение на выходе источников бесперебойного питания, при которых обеспечивается динамическая устойчивость технологического процесса.

Для подтверждения достоверности результатов моделирования на рис. 4 приведены зависимости скольжения двигателя ПЭД от времени и глубины провала напряжения [5].

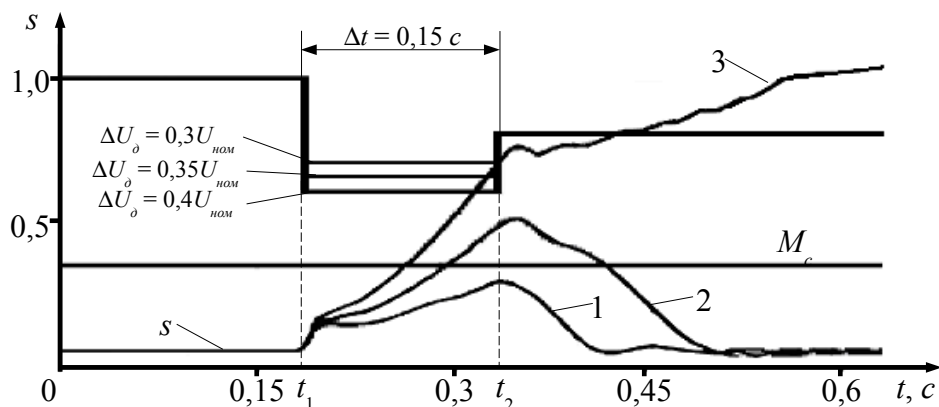


Рис. 4. Зависимости скольжения двигателя ПЭД от допустимого уровня потери входного напряжения  $\Delta U_\delta$

Зависимости построены применительно к глубине подвески 1600 м, коэффициенту использования  $k_u = 1$ . Кривая 1 соответствует потере напряжения  $\Delta U_\delta = 0,3$  о.е., кривая 2 –  $\Delta U_\delta = 0,35$  о.е.; кривая 3 –  $\Delta U_\delta = 0,4$  о.е. Из рис. 4 следует, что при потере напряжения 0,4 о.е. длительностью 0,15 с нарушается устойчивость работы ПЭД, что соответствует результатам моделирования. Полученные значения допустимого уровня потери входного напряжения для УЭЦН соответствуют данным, опубликованным в Стандарте предприятия СТП 57.00.047-81 «Комплексная система управления качеством продукции. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов» [6].

Очевидно, чем больше значение постоянной времени инерции, тем продолжительней может быть длительность провала напряжения, при которой не произойдет «опрокидывания» погружного электродвигателя, т.е. обеспечивается непрерывность технологического процесса.

При работе СД, включенного на сеть переменного тока, может возникнуть возмущение нормального режима вследствие изменения параметров электрических цепей СД или напряжений, действующих на его зажимах, а также механических сил на валу. При возникновении короткого замыкания (КЗ) в питающей сети происходит снижение напряжения питания. В результате СД может выпасть из синхронизма и перейти в асинхронный режим. Если за время перерыва электропитания угол нагрузки  $\Theta$  не превысит критического значения, произойдет самозапуск без потери синхронизма. На рис. 5 показаны зависимости допустимой потери напряжения в питающей сети от длительности КЗ для СДН-15-49-6 при различных значениях постоянной времени инерции  $T_j$ , при полуторакратной фор-

сировке напряжения возбуждения. Учет форсировки напряжения возбуждения в модели производится при падении напряжения в питающей сети более 15 % от номинального значения.

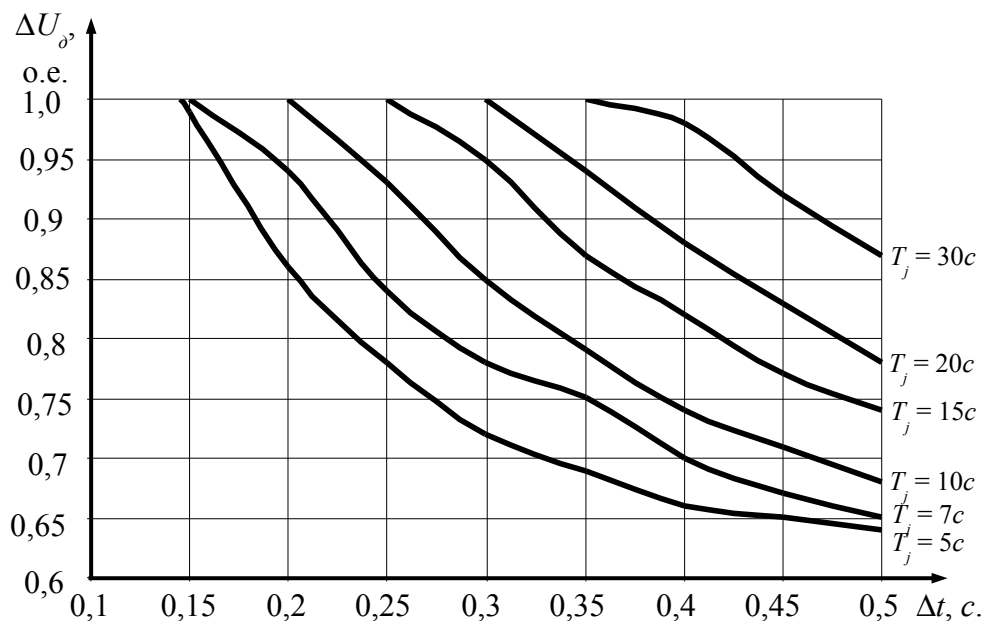


Рис. 5. Зависимости допустимой потери напряжения в питающей сети во время КЗ от длительности КЗ для СДН-15-49-6 при различных значениях  $T_j$ ,  $k_u = 1$

Полученные зависимости падения напряжения в питающей сети во время КЗ от длительности КЗ позволяют установить границы статической устойчивости синхронного двигателя при возникновении КЗ в питающей сети. Из рис. 5 видно, что при  $T_j = 5$  с и длительности провала напряжения  $\Delta t = 0,25$  с максимальное снижение напряжения питания, при котором СД не выпадет из синхронизма, составляет  $\Delta U_\delta = 0,775$  о.е. Также очевидно, что чем меньше момент инерции механизма и выше коэффициент загрузки двигателя, тем ниже граница статической устойчивости СД.

Таким образом, полученные результаты моделирования, базирующиеся на полученной обобщенной математической модели, могут быть рассмотрены как методическая основа для определения условий обеспечения непрерывности и устойчивости технологического процесса добычи нефти с применением установок электроцентробежных насосов с приводом от погружных электродвигателей, а также синхронных двигателей кустовых насосных станций.



### Литература

1. Поляков В.Е., Гусев В.И. Система гарантированного электроснабжения электропотребителей предприятий с непрерывным технологическим циклом (на примере ОАО «Севкабель») // Промышленная энергетика. 2009. № 11. С. 10-12.
2. Костенко М.П. Электродинамическое моделирование энергетических систем. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 419 с.
3. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Издательство МЭИ, 1997. 424 с.: ил.
4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972, 240 с. с ил.
5. Абрамович Б.Н., Иванов О.В., Коновалова С.А., Столяров И.И. Переходные процессы в компенсированной сети с асинхронным двигателем при возмущениях входного напряжения // Промышленная энергетика, 1984. №3. С. 32-34.
6. Стандарт предприятия СТП 57.00.047-81. «Комплексная система управления качеством продукции. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов». Гипротюменнефтегаз, 1981 г.

## THE DYNAMIC STABILITY OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS MOTORS IN OIL AND GAS ENTERPRISES

B.N. Abramovich, D.A. Ustinov, Yu.A. Sychev, I.G. Plotnikov  
*Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical university)*  
*Saint-Petersburg, Russia*  
*e-mail: bescheiden@rambler.ru*

**Abstract.** *There are some uninterruptible technological manufacturing processes which demand continuous power supply and it's interruption even of a few milliseconds can cause extensive economical losses. Published article is devoted to questions of definition of border of steady work of electrotechnical complexes with synchronous and asynchronous motors. The generalized mathematical model was developed for determining conditions of uninterruptible and stability of technological manufacturing process with electric power consumers, which allows to define the depth and duration of voltage dips and level of it's reconstruction. As a result of modelling the dependences have been revealed, allowing to define maximum permissible depth of voltage dips in power supply systems, and voltage on the exit of uninterrupted power supply sources at which dynamic stability of technological process is provided by the example of the installations with synchronous and asynchronous motors.*

**Keywords:** *continuity of technological processes, dynamic stability, electromechanical complex, voltage losses*

### References

1. Polyakov V.E., Gusev V.I. Sistema garantirovannogo elektrosnabzheniya elektropotrebitelei predpriyatii s nepreryvnym tekhnologicheskim tsiklom (na primere OAO «Sevkabel») (The guaranteed power supply electroconsumers of enterprises with continuous technological cycle (by the example of "Sevkabel")). *Promyshlennaya energetika*, 2009, Issue 11, pp. 10-12.
2. Kostenko M.P. Elektrodinamicheskoe modelirovanie energeticheskikh sistem. (Electrodynamic modeling of energy systems). Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1959. 419 p.
3. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. Perekhodnye protsessy v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennyye elektrodvigatel'noi nagruzkoi (Transients in industrial power supply systems due to electric motor load). Moscow: Publishing house of Moscow Power Engineering Institute, 1997. 424 p.
4. Onishchenko G.B., Yun'kov M.G. Elektroprivod turbomekhanizmov (Electrically driven fans, compressors and pumps). Moscow: Energiya, 1972, 240 p.
5. Abramovich B.N., Ivanov O.V., Konovalova S.A., Stolyarov I.I. Perekhodnye protsessy v kompensirovannoi seti s asinkhronnym dvigatelem pri vozmushche-niyakh vkhodnogo napryazheniya (Transients in a compensated network with asynchronous motor when disturbances in input voltage). *Promyshlennaya energetika*, 1984, Issue 3, pp. 32-34.

6. Corporate Standart STP 57.00.047-81. Kompleksnaya sistema upravleniya kachestvom produktsii. Urovni dopustimogo dinamicheskogo snizheniya pitayushchego napryazheniya pogruzhnykh tsentrobezhnykh elektronasosov (Acceptable levels of dynamic decrease of supply voltage of submersible centrifugal pumps). Giprotiyumeneftegaz, 1981.