

УДК 621.311:681.53

**ВЛИЯНИЕ РАБОТАЮЩИХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ УЗЛОВ  
КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ СТАНЦИЙ****Н. В. ГРУНТОВИЧ, А. А. КАПАНСКИЙ***Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь***В. М. ПУПИН, Д. О. САФОНОВ***ООО «НПК Промир», г. Москва, Российская Федерация***О. В. ФЁДОРОВ***Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный технический  
университет имени Р. Е. Алексеева»,  
Российская Федерация*

Сформирована база статистических данных и выполнен анализ причин остановов электродвигателей при кратковременных нарушениях электроснабжения в питающей энергосистеме на динамическую устойчивость синхронных и асинхронных приводов насосов электротехнической системы с комплексной нагрузкой. Исследовано влияние учета работающих синхронных и асинхронных электродвигателей на переходные процессы и уровни остаточных напряжений трансформаторных подстанций. Выявлено, что для обеспечения устойчивости насосных станций, снижения потерь при различных видах внешних коротких замыканий желательно использовать автоматику ввода резерва со временем реакции менее 10 мс. Предложено устройство супербыстродействующего ввода резерва, обеспечивающего время реакции 9 мс и полное время переключения на резервный ввод за 23–65 мс. Приведены результаты расчетных исследований, подтверждающие возможность бесперебойной работы потребителей насосных станций.

**Ключевые слова:** автоматический ввод резерва, выбег, динамическая устойчивость, короткие замыкания, кратковременные нарушения электроснабжения, насосные станции, частотно-регулируемый привод, самозапуск.

**EFFECT OF OPERATING ENGINES  
FOR RESIDUAL VOLTAGES OF ASSEMBLIES  
INTEGRATED STATION LOAD****N. V. GRUNTOVICH, A. A. KAPANSKY***Educational Institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus***V. M. PUPIN, D. O. SAFONOV***LLC "NPK Promir", Moscow, Russian Federation***O. V. FEDOROV***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev,  
Russian Federation*

*The article presents a statistical data base and analysis of causes of electric motors stop gear in case of short-term power supply disturbances in power supply system for dynamic stability of synchronous and asynchronous drives of electrical system pumps with complex load.*

*It was investigated, that the influence of counting of operating synchronous and asynchronous motors on transient processes and levels of residual voltages of transformer substations. It was revealed that in order to ensure the stability of pump stations, reduce losses at various types of external short circuits, it is advisable to use automatic reserve input with a reaction time of less than 10 ms. Device for super-fast input of reserve is proposed, providing reaction time of 9 ms and full time of switching to standby input for 23–65 ms. The article provides the results of calculation studies confirming the possibility of uninterrupted operation of pump station consumers.*

**Keywords:** automatic reserve entry, rundown, dynamic stability, short circuits, short-term power supply disturbances, pump stations, frequency-controlled drive, self-start.

## Введение

Для обеспечения первой категории надежности электроснабжения потребителей насосных станций (НС) важным и актуальным является выполнение следующих аспектов: наличие независимых источников питания [1], [2], супербыстродействующей реакции автоматики на аварийный режим, надежной работы релейной защиты и автоматики (РЗА), используемой на секциях распределительных устройств напряжением 6, 10, 20, 35 кВ, полного времени переключения на резервный источник за 23–65 мс, которое зависит от наличия асинхронных/синхронных (АД/СД) приводов насосов и механизмов электротехнических систем (ЭТС), а также отключение от внешнего короткого замыкания (КЗ) за время не более периода [3]–[5]. Целью работы является изучение влияния быстродействия блоков автоматического включения резерва (БАВР) на работу потребителей электроснабжения. Исследования выполнены в рамках задания ГПНИ № 1405/2021 от 18.03.2021 г.

Основными электроприемниками насосных станций являются синхронные и асинхронные с короткозамкнутым ротором электродвигатели приводов насосов, вентиляторов, компрессоров, имеющие высокий коэффициент загрузки и частотно-регулируемый привод (ЧРП) или устройство плавного пуска [6], [7] (рис. 1). Асинхронные двигатели чувствительны к кратковременным провалам напряжения глубиной более 30 %, так как в этих случаях не обеспечиваются условия их самозапуска после восстановления электроснабжения в результате работы существующей автоматики или срабатывания технологических защит.

Анализ кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) ЭТС нефте- и газоперерабатывающих, нефтедобывающих, металлургических, химических предприятий и насосных станций систем водо- и теплоснабжения, водоотведения выявил (рис. 1):

– согласно указаниям по устойчивости энергосистем [8] допускаются отключения КЗ в сетях 110 кВ длительностью 0,18 с (табл. 1), что часто приводит к остановам приводов (особенно низковольтных электродвигателей), браку продукции, выбросам «на факел» продуктов технологического производства, разливам нефти, других перекачиваемых жидкостей;

– критическое время нарушения непрерывности технологических процессов зависит от наличия «особых» потребителей, для которых оно не превышает 0,03 с;

– критическое время нарушения непрерывности технологических процессов составляет 0,06–0,125 с, т. е. значительно меньше требований нормативных документов по устойчивости электроэнергетических систем;

– решение по работе воздушных линий напряжением 110–220 кВ «в кольцо» (принятое в 1985–1990 гг.) привело к тому, что провалы напряжения одновременно появляются на обеих секциях подстанций, распределительных устройств напряжением 6, 10 кВ предприятий, вызывают отключения агрегатов двигатель-механизмов, приводят к срабатыванию защит и останову производств, исключают использование автоматического ввода резерва (АВР);

– на провалы напряжения реагируют частотные преобразователи и контроллеры, установленные на производственных линиях ЭТС, что приводит к останову технологического процесса, перезапуск которого после таких остановов может занимать до нескольких суток.

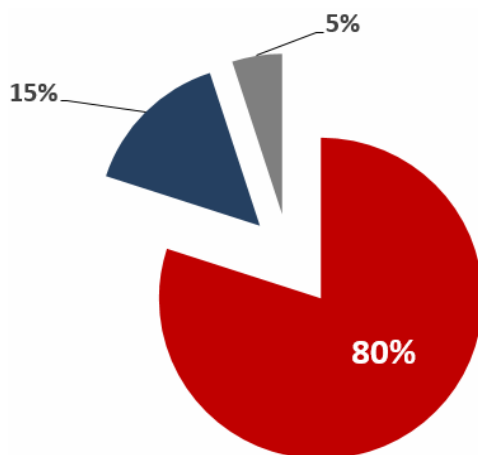


Рис. 1. Классификация кратковременных нарушений электроснабжения потребителей:

■ – внешние КЗ; ■ – КЗ у потребителя; ■ – отключения у потребителя

Таблица 1

**Расчетная длительность отключения короткого замыкания в зависимости от напряжения питающих сетей**

| Номинальное напряжение, кВ | 110  | 220  | 330  | 500  | 750  | 1150 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Время отключения КЗ, с     | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,08 |

Существующие устройства и принцип построения автоматики обеспечения непрерывности технологических систем на базе устройств АВР не позволяют обеспечить бесперебойную работу электродвигателей напряжением до 1 кВ, АД и СД напряжением 6, 10 кВ при наличии преобразователей в цепи питания [5]–[7]. Это приводит к выпадению из синхронизма синхронных двигателей, опрокидыванию асинхронных двигателей, отключению ЧРП, а также к срабатыванию технологических защит, отключению контакторов и пускателей напряжением 380 В. При больших временах АВР и несинфазном включении источников питания возможен гидравлический удар, вследствие чего возникают усилия, значительно превышающие величины, допустимые по условиям прочности трубопроводов и арматуры [9].

**Экспериментальные сведения по провалам напряжения и их влиянию**

Для проведения экспериментальных исследований использовались приборы ЭРИС-КЭ с возможностью непрерывной записи 176 параметров в память устройства в течение двух недель. Собранные данные по провалам напряжения на Оскольском электрометаллургическом комбинате за три года позволяют сопоставить уровни провалов напряжения и остановки (отключения) потребителей (табл. 2).

По данным актов событий выявлено, что в 17 случаях наблюдались остановки машин и механизмов. Анализ провалов напряжений свидетельствует, что было:

– 20 (45,45 %) однофазных провалов напряжения глубиной 9,4–100 % и длительностью 48–146 мс;

- 8 (18,18 %) двухфазных провалов напряжения глубиной 8,4–29,50 % и длительностью 72–184 мс;
- 16 (36,37 %) трехфазных провалов напряжения глубиной 13,3–77,6 % и длительностью 78–203 мс.

Таблица 2

**Статистика провалов напряжений на металлургическом предприятии при коротком замыкании в питающих сетях**

| Длительность, мс   | Глубина, %            | Число фаз | Последствия                               |
|--------------------|-----------------------|-----------|---|
| провала напряжения |                       |           |   |
| 135                | 25,6                  | 3         | Отключения насосов, компрессоров, станков |
| 200                | 14,5                  | 3         | Отключения насосов, компрессоров          |
| 120; 114; 122/120  | 12,8; 11,0; 11,4/11,0 | 1         | Все три без отключений потребителей       |
| 99/116             | 9,4/10,6              | 1         | Без отключений                            |
| 138                | 10,2                  | 2         | Отключение приводов с ЧРП                 |
| 196; 90            | 11,2; 24,3            | 3         | Отключения насосов, компрессоров, ЧРП     |
| 196; 130           | 11,2; 44,7            | 3; 1      | Все два без отключений потребителей       |
| 116                | 19,9                  | 3         | Отключение приводов с ЧРП                 |
| 111                | 30,49                 | 2         | Отключение отдельных машин                |
| 159                | 41,7                  | 3         | Отключения насосов, компрессоров, станков |
| 72; 72; 72         | 29,5; 28,4; 14,5      | 2; 1; 1   | Все три без отключений потребителей       |
| 168                | 30,90                 | 3         | Отключения насосов, компрессоров, станков |
| 79; 78             | 25,60; 32,0           | 3         | Отключение отдельных машин                |
| 170                | 19,00                 | 3         | Отключения насосов, компрессоров, станков |
| 48                 | 19,20                 | 1         | Без отключений                            |
| 203                | 16,20                 | 3         | Отключение приводов с ЧРП                 |
| 174                | 19,30                 | 2         | Без отключений                            |
| 124                | 13,30                 | 3         | Без отключений                            |
| 146                | 20,40                 | 3         | Отключение приводов с ЧРП                 |
| 146; 129           | 10,20; 34,70          | 1         | Без отключений                            |
| 141                | 14,50                 | 3         | Отключение отдельных машин                |
| 80; 58; 58         | 33,6; 100; 12,8       | 1         | Все три без отключений потребителей       |
| 453                | 69,1                  | 1         | Отключение отдельных машин                |
| 85                 | 77,6                  | 3         | Отключения насосов, компрессоров, станков |
| 97; 158; 182       | 16,7; 10,2; 8,4       | 2         | Все три без отключений потребителей       |
| 72; 65; 100        | 39,6; 33,0; 18,3      | 1         | Все три без отключений потребителей       |
| 142                | 16,4                  | 2         | Без отключений                            |
| 130; 81; 71        | 42,3; 39,6; 18,9      | 1         | Все три без отключений потребителей       |

Из 44 случаев провалов напряжения имеем:

- в двух случаях длительность провала 0,13 с, а глубина больше 19,1 %;
- в одном случае длительность провала 0,12 с, а глубина 10,5 %;
- в одном случае длительность провала 0,11 с, а глубина 15,3 %;

- в шести случаях длительность провала 0,10 с, а глубина от 15,7 до 28,1 %;
- в пяти случаях длительность провала 0,08–0,09 с, а глубина от 11,2 до 27,6 %;
- в оставшихся случаях аварийных режимов глубина провалов напряжения 10,1–11,0 %, а длительность 40–70 мс.

### Расчетная схема электроснабжения узлов комплексной электродвигательной нагрузки напряжением до 1 кВ, 6, 10 кВ

В рассматриваемой схеме электроснабжения представлены: две энергосистемы, электрическая сеть, выключатели, узлы промышленной комплексной нагрузки, ТП и КТП, содержащие электрические двигатели и прочую нагрузку (рис. 2). С помощью выключателей возможно изменение схемы электроснабжения и состава работающей нагрузки.

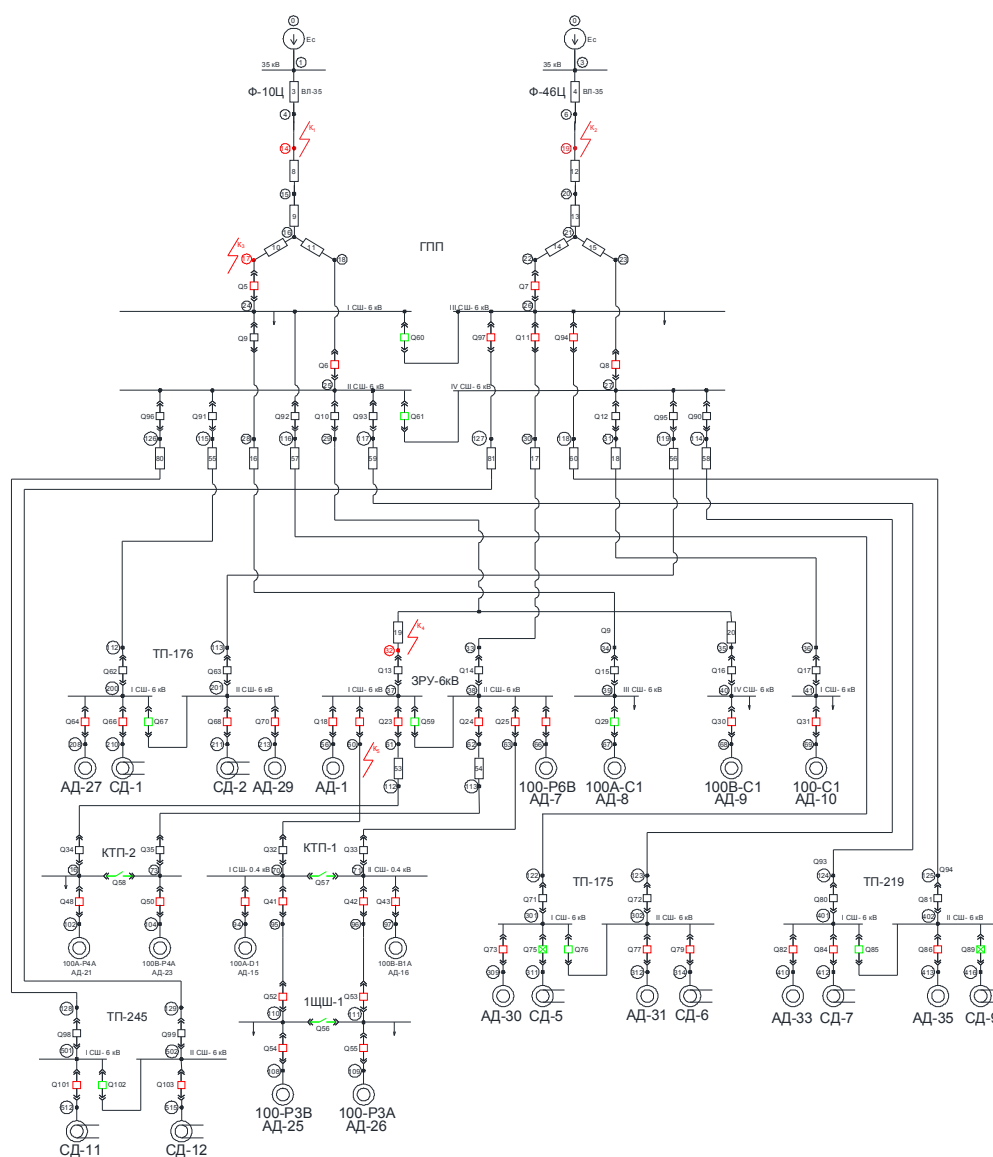


Рис. 2. Рассматриваемая схема электротехнического комплекса с насосными и компрессорными станциями

Исходная математическая модель системы электроснабжения содержала: 52 ветви (из них два источника питания), 19 узлов нагрузки, 61 выключатель и 26 асинхронных двигателей. Однако неучет высоковольтных СД и АД (как будет показано

ниже) приводит к погрешностям в определении остаточных напряжений и критической длительности КЗ.

Для учета влияния высоковольтных СД и АД, подключенных к другим ТП, но электрически связанных с ЗРУ-6кВ, доработана математическая модель системы электроснабжения (рис. 2).

Схема содержит 85 ветвей, 27 узлов нагрузки, 104 выключателя, 13 синхронных и 36 асинхронных двигателей. Электротехнический комплекс насосной станции с компрессорами в предлагаемой нами математической модели главной понизительной подстанции (ГПП) описывается системой из 173 дифференциальных уравнений. По информации технологов нефтехимических заводов наиболее критичными механизмами к провалам напряжения потребителей являются:

- в первую очередь потребители напряжением 6 кВ (чаще всего компрессора);
- затем потребители напряжением 0,4 кВ.

К критическим механизмам напряжением 0,4 кВ относятся на КТП-2 приводы:

- компрессоров 100(А, В)-С1;
- маслососов и циркуляционных насосов охлаждения компрессоров (щиты особой группы ЩОГ-1 и ЩОГ-2);
- сырьевых насосов 100(А, В)-Р1; 100(А, В)-Р6(А, В); 100(А, В)-Р7(А, В);
- воздухонагнетателей и дымососов 100(А, В)-В1(А, В) и 100(А, В)-D1.

Выход на режим после останова технологического процесса занимает сутки.

#### **Исследование режимов выбега на короткое замыкание и самозапуска комплексной нагрузки с учетом каждого электродвигателя своей системой дифференциальных уравнений**

Учет работающих СД и АД напряжением 6 кВ в методике геометрического сложения токов подпитки [10] (табл. 3) позволяет более точно подойти к выбору выключателей и параметров РЗА. Часто после таких расчетов можно было заменить выключатели с током динамической стойкости 25 кА на выключатели 20 кА.

Таблица 3

**Токи трехфазного короткого замыкания в сети 6 кВ  
с учетом подпитки от СД и АД, кА**

| Место короткого замыкания           | Номинальный режим | Максимальный режим |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
| На вводе 1с ГПП (узел 17)           | 12,74             | 12,74              |
| На вводе 2с ГПП (узел 25)           | 15,93             | 15,99              |
| На вводе 3с ГПП (узел 22)           | 16,38             | 16,40              |
| На вводе 4с ГПП (узел 27)           | 13,50             | 13,50              |
| Вблизи I секции шин 6 кВ (узел 32)  | 13,06             | 13,13              |
| Вблизи II секции шин 6 кВ (узел 33) | 13,33             | 13,35              |

Взаимное влияние переходных процессов электродвигательной нагрузки [11], [12] сказывается как на величинах остаточных напряжений на шинах секций ТП и КТП, так и обеспечении бесперебойной работы потребителей. Сравним результаты остаточных напряжений при изменении длительности короткого замыкания, которая зависит от времени работы автоматики АВР при трехфазном КЗ в узле 4:

1. Остаточные напряжения без учета СД и АД на ТП-245, ТП-175, ТП-176 (табл. 4).

Таблица 4

**Напряжения секций ТП и КТП в начальный момент самозапуска  
без учета синхронных и асинхронных двигателей**

| $T_{сз}, c$ | ЗРУ-6кВ      |       |       |              |       | КТП-1 0,4кВ  |       | КТП-2 0,4кВ  |       | 1ЩШ 0,4кВ    |
|-------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
|             | 1 сш         | 2 сш  | 3 сш  | 4 сш         | 5 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         |
| 0,025       | 0,894        | 0,898 | 0,937 | 0,884        | 0,882 | 0,845        | 0,851 | 0,810        | 0,825 | 0,841        |
| 0,045       | 0,898        | 0,898 | 0,938 | 0,888        | 0,882 | 0,850        | 0,851 | 0,815        | 0,825 | 0,846        |
| 0,065       | 0,901        | 0,898 | 0,939 | 0,892        | 0,882 | 0,853        | 0,851 | 0,818        | 0,825 | 0,850        |
| 0,200       | <b>0,769</b> | 0,898 | 0,909 | <b>0,756</b> | 0,882 | <b>0,700</b> | 0,851 | <b>0,641</b> | 0,824 | <b>0,692</b> |

*Примечание.* Жирно выделены параметры, при которых происходит отключение потребителей КТП и ТП после КЗ заданной длительности.

Из результатов расчета следует, что:

– напряжения секций, связанных с местом КЗ (узел 4 схемы на рис. 2), снижаются от значений 0,13–0,18 о. е. в первый момент выбега на КЗ до 0,038 о. е. – в конце выбега;

– в момент восстановления напряжения (соответственно  $t_2 = 0,2$  с) напряжение скачком возрастает до 0,64–0,78 о. е., после чего для ряда секций имеют место затухающие колебания, вызванные изменением режимов работы асинхронных электродвигателей и прочей нагрузки;

– наибольшее падение напряжения наблюдается на секциях следующих подстанций: 1 сш КТП-1 0,4 кВ, 1 сш КТП-2 0,4 кВ, 1 сш 1ЩШ 0,4 кВ, 1 сш ТП-78 6 кВ, 2 сш Т-1 6 кВ и 4 сш ТП-78 6 кВ, на которых напряжение в момент восстановления было меньше  $0,8U_{ном}$ . На 1 сш КТП-2 0,4 кВ напряжение в течение 0,6 с не превысило  $0,8U_{ном}$ .

2. Остаточные напряжения с учетом синхронных двигателей и асинхронных двигателей на ТП-175, ТП-176, ТП-219.

Нами выявлено, что при учете двигателей ТП-175, ТП-176 и ТП-219 остаточные напряжения на шинах секций ТП и КТП при трехфазном КЗ в узле 4 длительностью от 0,025 до 0,2 с меняются (табл. 5).

Таблица 5

**Напряжения секций ТП и КТП в начальный момент самозапуска  
при учете синхронных и асинхронных двигателей**

| $T_{сз}, c$ | ЗРУ-6кВ      |       |       |              |       | КТП-1 0,4кВ  |       | КТП-2 0,4кВ  |       | 1ЩШ 0,4кВ    |
|-------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
|             | 1 сш         | 2 сш  | 3 сш  | 4 сш         | 5 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         |
| 0,025       | 0,857        | 0,887 | 0,913 | 0,847        | 0,875 | 0,811        | 0,841 | 0,777        | 0,815 | 0,807        |
| 0,045       | 0,830        | 0,887 | 0,903 | 0,819        | 0,875 | 0,784        | 0,841 | <b>0,743</b> | 0,815 | 0,779        |
| 0,065       | 0,808        | 0,887 | 0,895 | 0,796        | 0,875 | 0,860        | 0,841 | <b>0,713</b> | 0,815 | <b>0,754</b> |
| 0,200       | <b>0,691</b> | 0,887 | 0,849 | <b>0,677</b> | 0,875 | <b>0,631</b> | 0,840 | <b>0,574</b> | 0,813 | <b>0,624</b> |

Из характеристик СД и данных по остаточным напряжениям следует, что даже при работе быстродействующего АВР (табл. 6) за время 45 мс напряжение на 1-й секции КТП-2 в начальный момент самозапуска будет ниже  $0,75 U_{ном}$ , что может вызывать останов низковольтных приводов маслонасосов и циркуляционных насосов охлаждения компрессоров (щиты особой группы ЩОГ-1 и ЩОГ-2).

Таблица 6

**Параметры секций и двигателей в начальный момент самозапуска**

| Длительность трехфазного короткого замыкания, мс | Минимальное напряжение ТП | Угол $\delta$ нагрузки СД, рад | Ток СД, о. е. | Ток АД, о. е.            | $U_{ад}$ , о. е. |
|--|---------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| 25   | $U_{y,16} = 0,778$        | $\delta_8 = 0,720$             | $I_6 = 1,15$  | $I_{32} = 2,16$          | $U_{21} = 0,750$ |
| 45   | $U_{y,16} = 0,743$        | $\delta_8 = 0,719$             | $I_6 = 1,35$  | $I_{32} = 3,09$          | $U_{21} = 0,715$ |
| 65   | $U_{y,16} = 0,715$        | $\delta_8 = 0,719$             | $I_6 = 1,46$  | $I_{32} = 3,42$          | $U_{21} = 0,682$ |
| 200  | $U_{y,16} = 0,579$        | $\delta_4 = 0,944$             | $I_6 = 2,30$  | $I_{32} = \mathbf{8,78}$ | $U_{21} = 0,548$ |

3. Остаточные напряжения с учетом синхронных двигателей на ТП-245 и асинхронных двигателей на ТП-175, ТП-176, ТП-219.

При учете двигателей ТП-175, ТП-176, ТП-219 и ТП-245 еще изменяются остаточные напряжения на шинах секций при трехфазном КЗ в узле 4 длительностью от 0,025 до 0,2 с, результаты которых сведены в табл. 7.

Таблица 7

**Напряжения секций ТП и КТП в начальный момент самозапуска**

| $T_{сз}$ , с | ЗРУ-6кВ      |       |       |              |       | КТП-1 0,4кВ  |       | КТП-2 0,4кВ  |       | 1ЩШ 0,4кВ    |
|--------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
|              | 1 сш         | 2 сш  | 3 сш  | 4 сш         | 5 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         | 2 сш  | 1 сш         |
| 0,025        | 0,944        | 1,028 | 1,011 | 0,935        | 1,007 | 0,936        | 1,022 | 0,908        | 0,999 | 0,807        |
| 0,045        | 0,908        | 1,028 | 0,996 | 0,897        | 1,007 | 0,899        | 1,022 | 0,863        | 0,999 | 0,894        |
| 0,065        | 0,879        | 1,028 | 0,925 | 0,867        | 1,007 | 0,868        | 1,022 | 0,824        | 0,999 | 0,863        |
| 0,200        | <b>0,731</b> | 1,028 | 0,925 | <b>0,714</b> | 1,007 | <b>0,699</b> | 1,022 | <b>0,631</b> | 0,998 | <b>0,691</b> |

При работе сверхбыстродействующей автоматики АВР за время 65 мс напряжение на 1-й секции КТП-2 в начальный момент самозапуска будет ниже  $0,85 U_{ном}$ , что может вызывать останов низковольтных приводов маслонасосов и циркуляционных насосов охлаждения компрессоров (щиты особой группы ЩОГ-1 и ЩОГ-2).

Исследование возможных времен работы БАВР (табл. 8) позволяет оценить максимальные углы СД, токи АД и СД и минимальные напряжения на выводах двигателей в первый момент восстановления напряжения после работы АВР.

Таблица 8

**Параметры секций и двигателей в начальный момент самозапуска**

| БАВР | Минимальное напряжение ТП   | Угол $\delta$ нагрузки СД, рад | Ток СД, о. е.   | Ток АД, о. е.            | $U_{ад}$ , о. е. |
|------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------|------------------|
| 25   | $U_{y,16} = 0,908$          | $\delta_{11} = 0,882$          | $I_{11} = 3,06$ | $I_{30} = 2,50$          | $U_{21} = 0,991$ |
| 45   | $U_{y,16} = 0,863$          | $\delta_{11} = 0,905$          | $I_{11} = 3,65$ | $I_{30} = 3,52$          | $U_{21} = 0,837$ |
| 65   | $U_{y,16} = 0,824$          | $\delta_{11} = 0,940$          | $I_{11} = 3,91$ | $I_{30} = 4,29$          | $U_{21} = 0,793$ |
| 200  | $U_{y,16} = \mathbf{0,631}$ | $\delta_{11} = 1,507$          | $I_{11} = 5,14$ | $I_{30} = \mathbf{9,36}$ | $U_{21} = 0,591$ |



Из проведенных исследований самозапуска можно сделать следующие выводы:

- При трехфазном КЗ в сети 35 кВ (узел 4) длительностью  $t_{\text{КЗ}} = 0,2$  с в момент восстановления напряжения на шинах секций (2 сш ГПП, 1 сш ЗРУ-6кВ, 4 сш ЗРУ-6кВ, 1 сш ТП-175, 1 сш ТП-176, 1 сш ТП-219, 1 сш ТП-245, а также 1 сш КТП-1, 1 сш КТП-2, 1 сш ИЩШ) не превышают 0,75 о. е. и после ряда колебаний, вызванных изменениями режимов работы СД и АД, достигают ко времени  $t = 0,56$  с  $0,9U_{\text{НОМ}}$ . Напряжения на проблемных секциях, указанных выше, в течение 0,4 с не превышают  $0,85U_{\text{НОМ}}$ .

- Все СД и АД, питающиеся от ГПП, при работе устройств БАВР за время  $t = 65$  мс сохраняют динамическую устойчивость. Однако для схемы модели ГПП с учетом ЭД ТП-175, ТП-176, ТП-219, ТП-245 время работы БАВР не должно превышать 25 мс.

- Токи включения ряда электродвигателей ( $I_{\text{вкл}, 32} = 9,36 > I_{\text{н}} = 6,5$  о. е.) при переключении на резервный источник после КЗ длительностью 0,2 с выше пусковых, что может привести к выходу АД из строя.

- Угол нагрузки СД привода компрессора при указанных длительностях трехфазных КЗ не достигает критических значений.

- Зоной защиты быстродействующей автоматики АВР, установленной на секционных выключателях  $Q_{60}$  и  $Q_{61}$ , являются все кратковременные нарушения электроснабжения, которые произойдут выше места их установки, т. е. короткие замыкания и отключения электроснабжения в сетях 35, 110 кВ. Зоной защиты БАВР, установленного на секционном выключателе  $Q_{59}$ , являются как КЗ и отключения питания в сетях 35, 110 кВ, так и провалы напряжения в сетях 6 кВ трансформаторных подстанций, получающих электроснабжение 1–4 сш ГПП. Чем ближе к месту подключения защищаемой нагрузки смонтировано устройство БАВР, тем больше зона работы устройства. При работе БАВР этапы переходных процессов протекают следующим образом:

- трехфазное КЗ в цепи питания длительностью  $t_1 \leq 0,09$  с (складывается из времени определения пусковым органом БАВР факта нарушения нормального электроснабжения ( $t = 0,03$ – $0,09$  с));

- выбег электродвигательной нагрузки после отключения КЗ длительностью  $t_2 = 0,13$ – $0,19$  (до времени отключения вводного выключателя  $Q_{13}(Q_{14})$ );

- самозапуск с момента включения секционного выключателя  $Q_{59}$  на ТП-78 6 кВ ( $t = 0,025$  с).

### Обеспечение бесперебойной работы потребителей комплексной нагрузки

Выполненный анализ устройств АВР [13]–[15] выявил, что лучшими пусковыми являются те, в которых помимо реле минимального напряжения используются также органы направления мощности (тока), контроля угла рассогласования векторов напряжений рабочего и резервного источников, особое реле направления тока [16], позволяющие обеспечить минимальное время реакции на аварийный режим, надежную работу устройства как при КЗ, так и при самопроизвольном отключении головных выключателей (когда должен работать орган как контроля угла выбега секций распределительное устройство (РУ), так и максимального тока):

$$S_{\text{БАВР}} = f(U_{\text{min}}, U_{\text{max}}, \delta_{12} \updownarrow P, I_{\text{min}}, I_{\text{max}}),$$

где  $U_{\text{min}}$  – уставка пуска БАВР по напряжению прямой последовательности на аварийной СШ;  $U_{\text{max}}$  – минимальное напряжение прямой последовательности на резервной СШ при пуске БАВР;  $\delta_{12}$  – угол между векторами напряжений прямой последовательности на аварийной и резервной СШ;  $\updownarrow P$  – направление мощности

прямой последовательности;  $I_{\min}$  – уставка минимального тока на аварийном вводе,  $I_{\max}$  – уставка максимального тока на аварийном вводе.

На основании проработки различных устройств АВР для бесперебойной работы потребителей насосных станций взято устройство БАВР 072 [16]–[18], приведенное на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид терминала БАВР 072

Пуск БАВР 072 может осуществляться как от пусковых органов РЗА подстанции 110 (220) кВ, так и по фактам снижения напряжения прямой последовательности на потерявшем питание вводе, разницы между углами векторов ЭДС двигателей и напряжения прямой последовательности «здоровой» секции с контролем направления мощности прямой последовательности на вводах подстанции от шин в сторону питания. Зоной защиты БАВР для распределительных устройств напряжением 6 кВ являются:

- все виды КЗ (трехфазных, междуфазных, однофазных, двухфазных на землю) в одной из цепей питания сети 110 (220) кВ;
- несанкционированные отключения выключателей в сети 110 и 35 кВ;
- все виды внешних КЗ в сетях 110, 35 и внутренних 6 кВ, вызывающие провалы напряжения, опасные для функционирования насосной станции.

При выборе БАВР необходимо учитывать характер переходных процессов при выбеге на КЗ и при восстановлении электроснабжения, который зависит от типа выключателей, реакции устройства АВР, состава нагрузки на секциях РУ. Для обеспечения остаточных напряжений выше  $0,9U_{\text{ном}}$  на шинах секций РУ ПС напряжением 6, 10 кВ и ТП напряжением 380 В необходимо, чтобы отключение КЗ (или время выбега при отключении головного выключателя) на превышало 20 мс. Чем меньше время выбега на КЗ или при отключении головного выключателя, тем меньше затормозятся электродвигатели и меньше будут токи в момент самозапуска. Разница в 20 мс согласно расчетам ЭТС нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих, химических и металлургических предприятий приводит к увеличению токов двигателей в момент самозапуска в 1,5–2 раза.

Итак, снижение длительности реакции устройств БАВР существенно влияет на устойчивость работы приводов насосов, обеспечивает такой уровень напряжений на шинах РУ и ТП, при котором исключены отключения низковольтных двигателей, опрокидывания СД и АД, сбои РЗА и управления технологическими процессами. На рис. 4 представлен общий вид шкафа быстродействующей автоматики ввода резерва.



Рис. 4. Шкаф быстродействующей автоматики ввода резерва

Опыт работы устройств БАВР 072 на рассматриваемых объектах подтвердил следующее:

- минимальное время реакции на аварийный режим 3–9 мс;
- переключение на резервный ввод осуществляется всегда с соблюдением синфазности источников питания;
- работают при несимметричных КЗ в питающей энергосистеме, используя контроль направления мощности и особое реле направления тока;
- надежно работают как при наличии синхронных и(или) асинхронных двигателей напряжением 6(10) кВ, так и при их отсутствии;
- увеличивают ресурс электродвигателей, насосов, трансформаторов ввиду снижения токов самозапуска в 2–3 раза;
- исключают экологические катастрофы из-за предотвращения гидравлических ударов в нефтепроводах и газопроводах при нарушениях питания в энергосистеме;
- окупаемость устройства БАВР 072 составляет не более года.

Применение БАВР 072 позволяет осуществить почти мгновенный переход на резервный источник питания.

### **Заключение**

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для удержания в работе СД и АД приводов насосов предлагается устройство быстродействующего АВР со временем реакции на аварийный режим не более 9 мс и полным временем переключения на резервный ввод за 23–65 мс.

2. Опыт внедрений устройств БАВР 072 доказал их надежную работу при любых сочетаниях включенной нагрузки насосных станций. При снижении времени реакции БАВР с 50 до 20 мс ток СД в момент восстановления напряжения уменьшается с 3,85 до 2,14 о. е., напряжение на выводах СД увеличивается до  $U_{сд} = 0,91$  о. е. и ко времени  $t = 60$  мс становится номинальным.

3. При времени реакции БАВР на аварийный режим не более 9 мс и полном времени переключения на резервный ввод за 65 мс двигатели насосов, вентиляторов, компрессоров сохраняют устойчивость и непрерывность технологических процессов.

## Литература

1. Абрамович, Б. Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий : учеб. пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Д. А. Устинов ; С.-Петерб. гос. гор. ин-т. – СПб. : С.-Петерб. гос. гор. ин-т, 2008. – 81 с.
2. Patrick, J. Refinery power failures: causes, costs and solutions / J. Christensen Patrick, William H. Graf, Thomas W. Yeung // Hydrocarbon Publishing Company. – 2013. – July. – P. 1–6. – Режим доступа: [www.digitalrefining.com/article/1000773](http://www.digitalrefining.com/article/1000773). – Дата доступа: 03.02.2021.
3. Мишуков, Н. А. Повышение надежности систем электроснабжения ВСТО / Н. А. Мишуков, Е. З. Зайцев // Трубопровод. трансп. нефти. – 2009. – № 12. – С. 9–11.
4. Аптекарь, Д. И. Методы и средства повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей / Д. И. Аптекарь, Г. М. Рубашев, Д. В. Чиканков // Новости электротехники. – 2001. – № 2 (8). – С. 10–11.
5. Гуревич, Ю. Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – М. : Элекс-КМ, 2005. – 408 с.
6. Goh, H. H. Comparison between direct-online, star-delta, and auto-transformer induction motor starting methods in terms of power quality / H. H. Goh, M. S. Looi, B. C. Kok // Proc. Int. Multi-Conf. Eng. Comput. – Scientists, 2009. – P. 1558–1563.
7. Ершов, С. В. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения / С. В. Ершов, М. С. Пигалов // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2017. – № 12-1. – С. 95–104.
8. Методические указания по устойчивости энергосистем : утв. Приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 277. – М. : НЦ ЭНАС, 2004. – 16 с.
9. Расчет условий возникновения гидравлических ударов в системах водоснабжения и канализации / В. М. Пупин [и др.] // Электрика. – 2011. – № 1. – С. 21–26.
10. Закутнов, В. А. Моделирование и расчет режимов работы электротехнического комплекса очистных сооружений при наличии мини-ТЭС / В. А. Закутнов // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов : Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. – Тольятти, 2009. – С. 21–26.
11. Сивокобыленко, В. Ф. Анализ переходных процессов в двигательной нагрузке при переключениях питания на резервный источник / В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Деркачев // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2016. – № 5 (547). – С. 69–74.
12. Ayamolowa, O. J. Fault Analysis of Injection Substation Using Symmetrical Component Method / O. J. Ayamolowa, O. Folorunso, E. Buraimoh // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2017. – Vol. 6, iss. 10. – P. 83–97.
13. Jantke, K. 30 ms High Speed Transfer System for optimized supply of energy / K. Jantke, R. Krumm, R. Vieille // Elektrotechnik + Automation. – 2001. – № 22. – 2001. – P. 1–2.
14. Luciano Di Maio. Fast power switchover keeps production lines running / Luciano Di Maio, Carlo Gemme, Ralf Krumm // ABB Reviw. – 2002. – № 2. – P. 38–42.
15. PCT WO 03/056679 A1 от 10.07.2003. High Speed Transfer System / Luciano Di Maio, Andrea Andenna, Fabio Gatelli, Andrea Crespi // PCT/EP02/14489, 10.07.2003.

16. Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей (варианты) и устройство для его осуществления : пат. № 2398338 РФ, H02J 9/06 / В. А. Жуков, В. М. Пупин (Россия). – 2009130901/09 ; заявл. 30.04.2009 ; опубл. 27.08.2010 // Бюл. № 24.
17. Перспективные устройства АВР в системах электроснабжения насосных станций / Н. А. Кокорев [и др.] // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сб. науч. тр. – Вып. 12. – Чебоксары, 2017. – С. 70–91.
18. Федоров, О. В. Ресурсосбережение в энергетике / О. В. Федоров, Н. В. Голубцов, И. И. Гребенюк. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 246 с.

*Получено 03.06.2021 г.*