

УДК 621.31

## ОСОБЕННОСТИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ИХ РАБОТЕ НА ДВИГАТЕЛЬНУЮ НАГРУЗКУ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

### В.С. Бойчук

Начальник объединенной диспетчерской службы ПО «Северные электрические сети» ОАО «Воронежэнерго», почетный работник топливно-энергетического комплекса РФ, кандидат технических наук, e-mail: bvs047@mikt.ru

### В.Б. Фурсов

Доцент кафедры электротехники Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук, e-mail: kafedraelvgty@mail.ru

### В.А. Сергеев

Доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук, e-mail: emses@mail.ru

### Ж.А. Ген

Старший преподаватель кафедры электротехники Воронежского государственного технического университета, e-mail: kafedraelvgty@mail.ru

В статье рассмотрены режимы работы каскада трансформаторных подстанций на двигательную нагрузку при разрыве одной фазы питающего напряжения.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, условия самозапуска, перенапряжения, несимметрия напряжений, двигательная нагрузка.

На практике часто приходится сталкиваться с ненормальными схемами аварийного режима питания силовых трансформаторов систем электроснабжения, вызванных обрывом одной фазы воздушной ЛЭП без замыкания на землю. Причинами подобных режимов могут быть как природные явления (сильный ветер, гололед и т.п.), так и короткие замыкания, вызывающие порою отгорание шлейфов ВЛ на опорах линий. В этом случае возникает неполнофазный режим работы трансформаторных подстанций и питающихся от них потребителей.

На рис. 1 показана расчетная схема участка электроэнергетической системы, состоящей из двух подстанций Т1 и Т2, двух воздушных линий и распределительного устройства с электродвигателями напряжением 6 кВ. Для города Воронежа такая расчетная схема соответствует реальной ситуационной схеме электроснабжения городских водоподъемных станций с насосными агрегатами мощностью в несколько сотен киловатт. Электродвигатели насосов относятся к нагрузке первой категории надежности электроснабжения, отключение которых крайне нежелательно. При этом питание потребительский подстанций Т1 (35/6 кВ)

производится от главных понижающих подстанций Т2 (110/35/6 кВ) по воздушным линиям Л1 и Л2, выполненным проводом марки АС сечением до 120 мм<sup>2</sup>.

Рассмотрим режим работы при обрыве одной из фаз на ВЛ № 1 без последующего замыкания на землю. Трансформатор Т1 имеет со стороны ВН (35 кВ) схему соединения обмоток «звезда с изолированной нейтралью». Такая же схема соединения обмоток у трансформатора Т2 со стороны ВН (110 кВ) и СН (35 кВ). Обмотки НН Т1 (6 кВ) и НН Т2 (6 кВ) соединены «треугольником». Таким образом, в системе не имеется заземленных нейтралей и она полностью симметрична относительно земли в электрическом отношении.

На рис. 2 показана соответствующая математическая модель, выполненная в среде MATLAB 7.5.

Параметры математической модели:

Трансформатор Т1:  $S_{\text{H}} = 10 \text{ MVA}$ ;  $U_{\text{ВН}} = 35 \text{ кВ}$ ;  $U_{\text{НН}} = 6 \text{ кВ}$ ; схема соединения обмоток – Y/Δ-11;  $u_{\text{кз}} = 5 \%$ .

Трансформатор Т2:  $S_{\text{H}} = 25 \text{ MVA}$ ;  $U_{\text{ВН}} = 110 \text{ кВ}$ ;  $U_{\text{СН}} = 35 \text{ кВ}$ ;  $U_{\text{НН}} = 6 \text{ кВ}$ ; схема соединения обмоток – Y/Y Δ-0-11;  $u_{\text{кз}} = 5 \%$ .

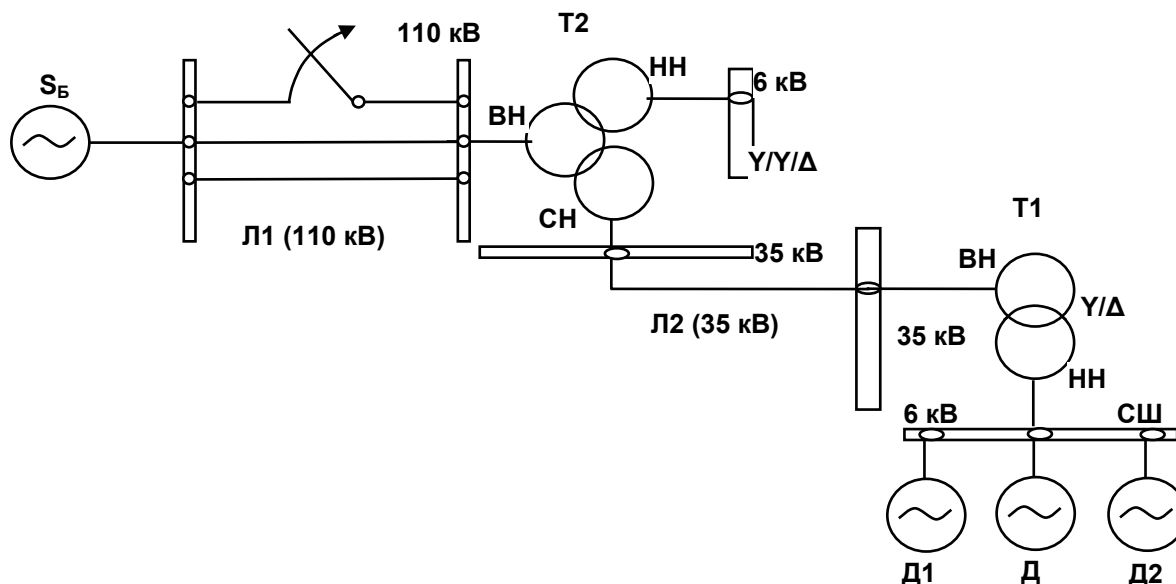


Рис. 1. Расчетная схема

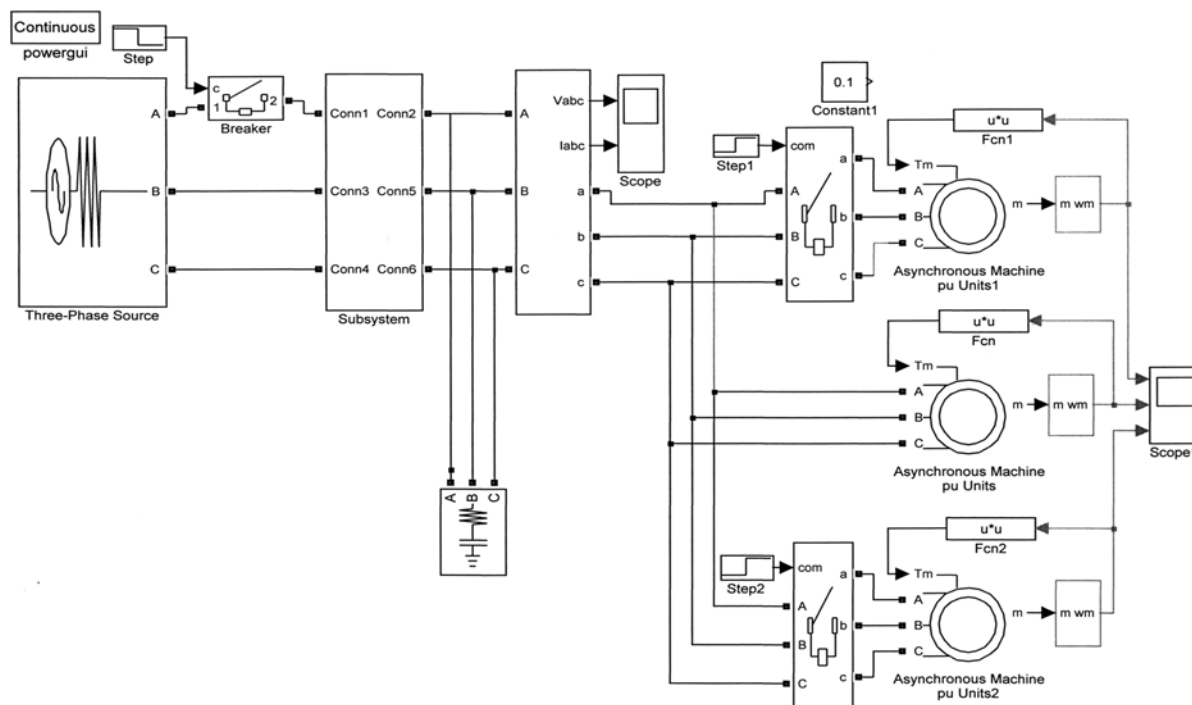


Рис. 2. Математическая модель расчетной схемы

Линия Л2 между трансформаторами Т1 и Т2 – воздушная, выполнена проводом АС-120 и АС-70, длина линии около 6 км.

Между трансформатором Т2 и нагрузкой – кабель длиной от 100 до 1000 м (проводился ряд расчетов при различной длине линии).

Моделировались два режима работы: нагрузка трансформатора Т1 на пассивную активно-индуктивную нагрузку и нагрузка трансформатора Т1 на активную (двигательную) нагрузку.

В качестве нагрузки в модели использованы асинхронные электродвигатели мощностью от 50 до 150 кВт, учтено также небольшое емкостное сопротивление кабельных линий от мест установки двигателей до РУ 6 кВ.

Решения в виде мгновенных и действующих значений линейных напряжений и токов на РУ 6 кВ приведены для случая пассивной активно-индуктивной нагрузки – на рис. 3, 4 и для активной (двигательной) нагрузки – на рис. 5–8.

Математическое моделирование показало:

1. Для систем с пассивной нагрузкой напряжение между двумя «здоровыми» фазами составляет  $0,866U_{\text{нл}}$ , а между поврежденной и «здоровой» фазой оно равно нулю.

2. Для систем с двигательной нагрузкой отметим повышение линейных напряжений в двух фазах в 1,4–1,5 раза, т.е. до 8,7–9,3 кВ и возрастание токов в фазах в 5,94 раза.

3. С увеличением числа работающих двигателей до трех уровень линейных напряжений понижается до  $(1,1-1,2) U_{нл}$  и уровень токов составил  $(2,5-2,7)$  от тока до обрыва фазы. Таким образом, токи в системе могут значительно превысить номинальные и при длительной работе привести к перегреву системы и выходу из строя.

Таким образом, режим обрыва фазы на стороне 110 кВ опасен для двигателей насосов при числе работающих двигателей не более трех. Существующие системы защиты от перегрузки (максимально токовая защита, защита минимального напряжения, защита от перегрузки по току) оказываются неэффективными. Во всех случаях небольшая по величине, но длительная по времени перегрузка, не может быть эффективно отключена указанными «грубыми» защитами.

В соответствии с требованиями ПУЭ (п. 5.3.52) «В электроустановках промышлен-

ных предприятий в случае, когда не может быть осуществлен одновременный самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов, следует применить отключение части таких ответственных механизмов и их автоматический повторный пуск по окончании самозапуска первой группы электродвигателей.

Включение последующих групп может быть осуществлено по току, напряжению или времени». Данное требование является обязательным для ответственных механизмов, работа которых должна контролироваться средствами релейной защиты и автоматики. К числу таких средств относится:

- защита от неполнофазных режимов (обрыв одной фазы);
- защита от несимметрии питающего напряжения;
- защита от провалов напряжения при эксплуатации.

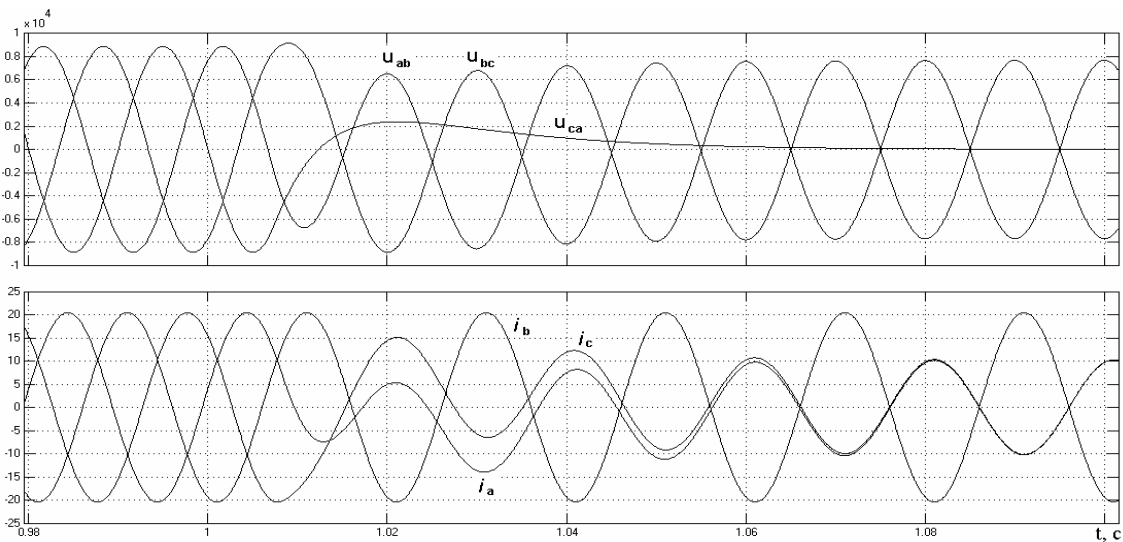


Рис. 3. Мгновенные значения линейных напряжений и фазных токов для случая пассивной активно-индуктивной нагрузки

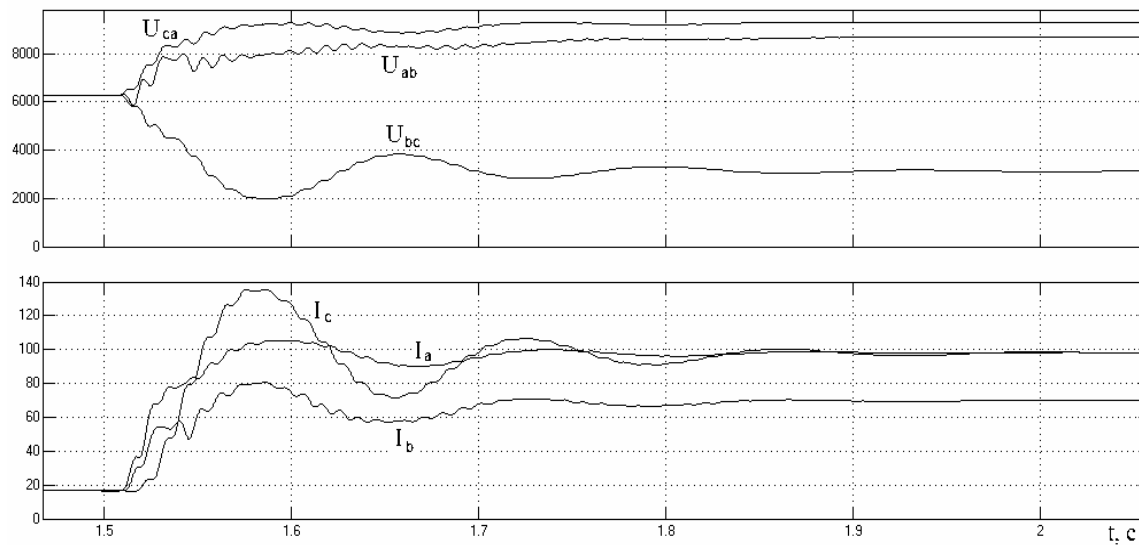


Рис. 4. Действующие значения линейных напряжений и фазных токов для случая пассивной активно-индуктивной нагрузки

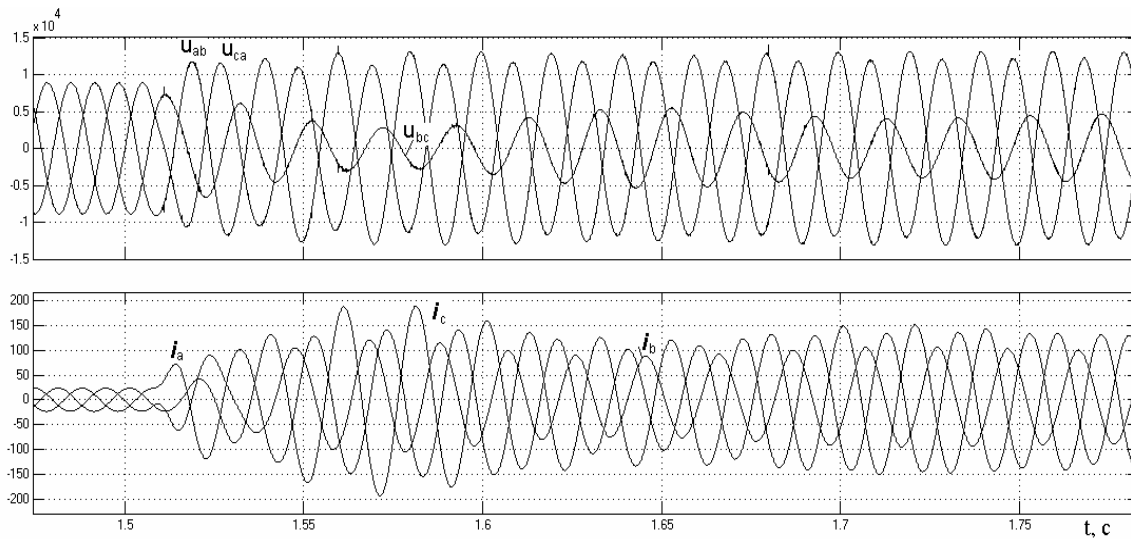


Рис. 5. Мгновенные значения линейных напряжений и токов при работе одного двигателя в качестве нагрузки

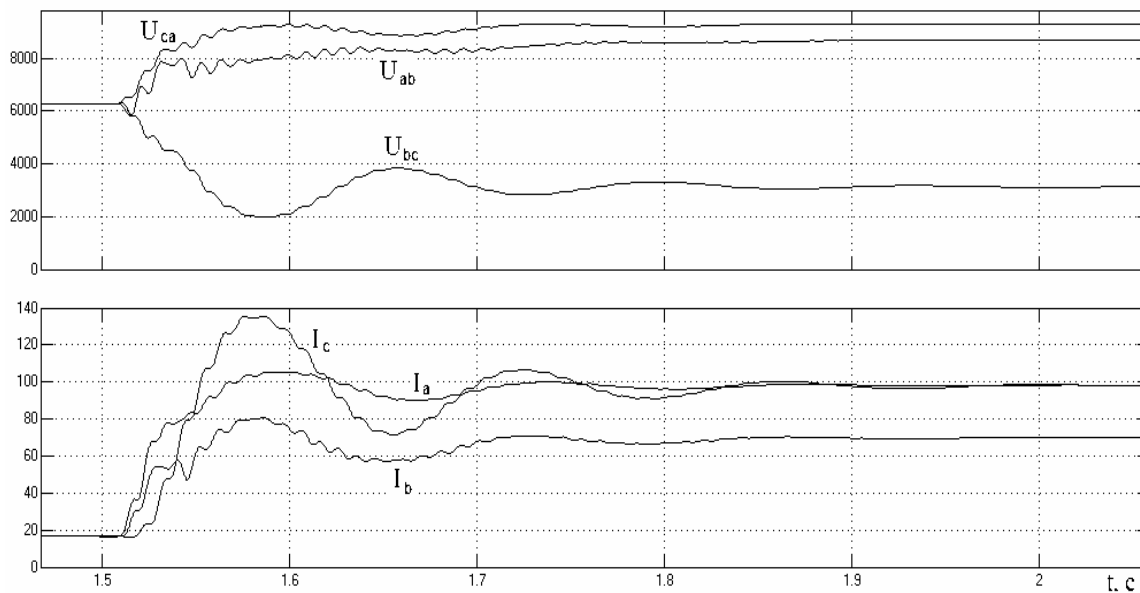


Рис. 6. Действующие значения линейных напряжений и фазных токов при работе одного двигателя в качестве нагрузки

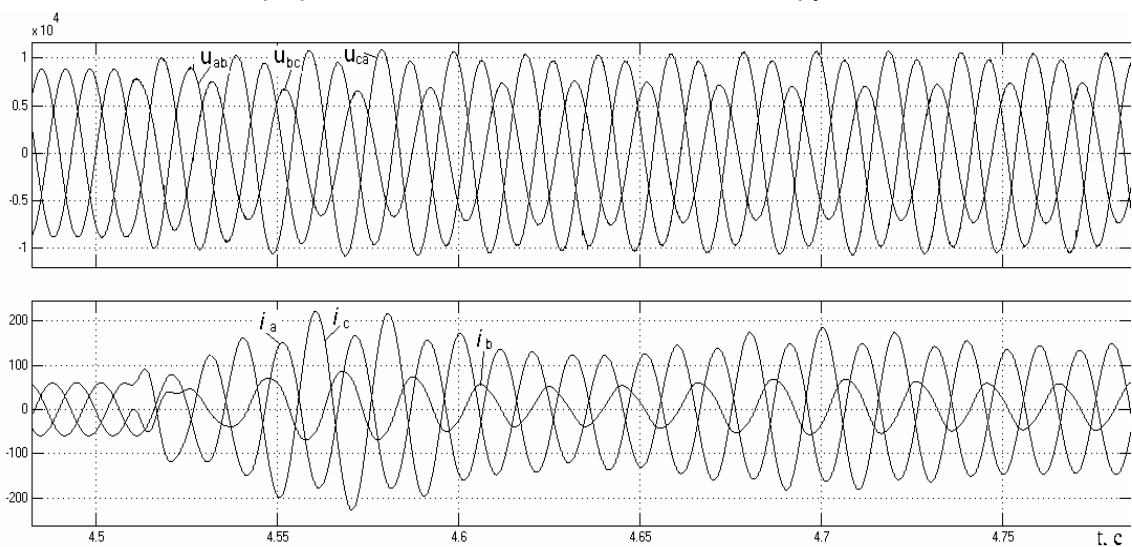


Рис. 7. Мгновенные значения линейных напряжений и фазных токов при работе трех двигателей в качестве нагрузки

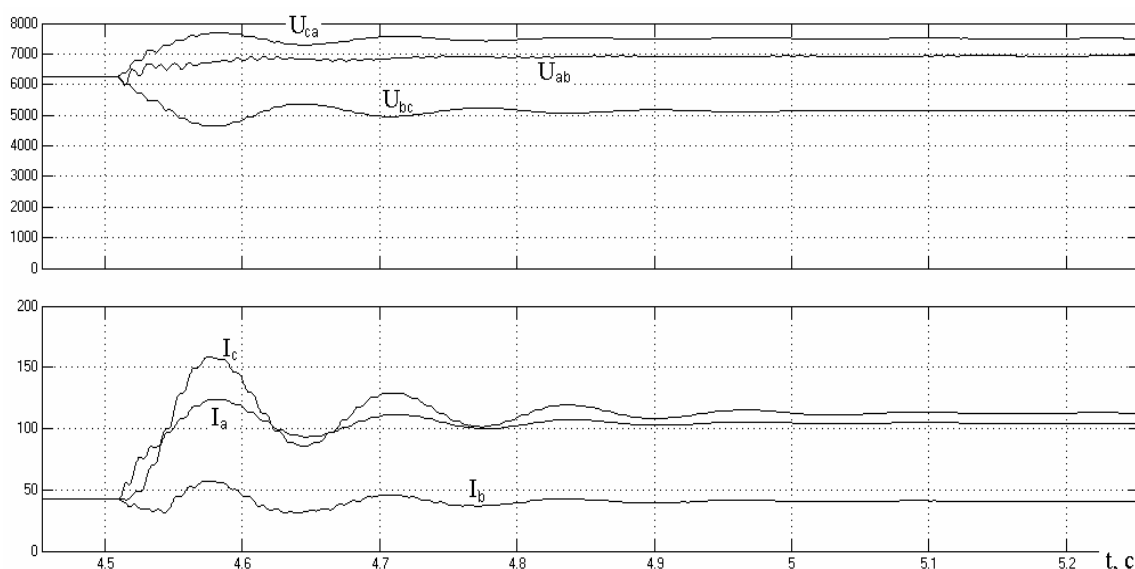


Рис. 8. Действующие значения линейных напряжений и фазных токов при работе трех двигателей в качестве нагрузки

Как видим, этот вопрос остается с нормативной точки зрения совершенно непроработанным.

Во-первых, непонятны условия самозапуска ответственных механизмов. Во-вторых, как быть с механизмами, отключение которых без резервирования вообще невозможно? К числу таких механизмов могут относиться электро-

двигатели питательных насосов паровых котлов. Целесообразно было бы в таких случаях включать на параллельную работу, наоборот, наибольшее количество однотипных электродвигателей с допустимой нагрузкой до 65–70 % от суммарной номинальной мощности. Очевидно, что в главе 5 ПУЭ этот вопрос не отражен на современном уровне.

#### Литература

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1986. – 640 с.
2. Зайцев А.И. Оценка возможных перенапряжений и токовых перегрузок в узлах нагрузки, влияющих на работоспособность конденсаторных установок / А.И. Зайцев, В.С. Бойчук, В.А. Сергеев, А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 8–12.
3. Зайцев А.И. Электроснабжение : учеб. пособие : в 2-х ч. Ч. 2 / А.И. Зайцев. – Воронеж : Научная книга, 2005. – 124 с.

## FEATURES OF OPERATING MODES OF THREE-PHASE TRANSFORMERS AT THEIR WORK ON IMPELLENT LOADING OF PUMP UNITS

V.S. Bojchuk, V.B. Fursov, V.A. Sergey, J.A. Gen

*In article operating modes of the cascade of transformer substations on impellent loading are considered at break of one phase of a having voltage.*

*Key words: system of electrosupply, conditions of self-start, overvoltage, asymmetrical voltage, impellent loading.*