

\* \* \*

## Анализ провалов напряжения при пуске электродвигателей с вентиляторной нагрузкой

АРАКЕЛЯН А.К., КАЛИНИН А.Г.

*Математически обоснован расчет провалов напряжения в проектируемых или эксплуатируемых электроустановках по имеющимся паспортным данным. Показаны способы расчета провалов на динамической модели электропривода, рассмотрены энерго-сберегающие мероприятия при пуске электродвигателей с вентиляторной нагрузкой.*

**Ключевые слова:** электропривод, пуск электродвигателя, провалы напряжения, вентиляторная нагрузка

Основным энергоемким оборудованием объектов коммунального хозяйства и ряда отраслей промышленности являются насосные агрегаты или вентиляционные установки с асинхронными (АД) или синхронными (СД) электродвигателями. Практика пусков таких потребителей прямым включением в сеть сопровождается большими ударными токами и знакопеременными электромагнитными моментами. Как следствие – усталостное разрушение механических частей и уменьшение межремонтного периода. Броски пускового тока вызывают также значительные (до 30%) провалы напряжения на шинах распределительных устройств, что негативно сказывается на работе соседних потребителей. Безопасным с точки зрения технического регламента считается уровень провала не более 10%.

*Calculation of voltage dips in designed or operating electrical installations on the basis of available input data is mathematically substantiated. Methods for calculating voltage dips on an electric drive's dynamic model are shown, and energy conservation measures that can be taken during startups of electric motors with a fan-type load are considered.*

**Key words:** electric drive, startup of electric motor, voltage dips, fan-type load

Традиционно на этапе проектирования трансформаторы для подстанций выбираются по потребной мощности электроприемников, однако исследования показывают: чтобы предел провала напряжения не превышал 10%, требуется выбирать мощность трансформатора на ступень выше или ограничивать пусковые токи с помощью устройств плавного пуска (УПП) или преобразователей частоты (ПЧ).

Цель исследования – расчет провалов напряжения в проектируемых или эксплуатируемых электроустановках по имеющимся исходным данным; анализ влияния параллельно работающей нагрузки на пуск; расчет провалов напряжения при установке ПЧ, УПП или трансформатора большей мощности. Результаты расчетов определяют выбор устройства пуска конкретного двигателя или группы

двигателей с учетом их технических возможностей и стоимости оборудования.

Актуальность вопросов связана с отсутствием объективных данных о техпроцессах и нагрузках электрооборудования, эксплуатируемого более 10 лет, статистикой сбоев и отказов при пусках мощных электродвигателей, из-за чего эксплуатационные службы предпочитают не останавливать работающие агрегаты.

Провал напряжения рассчитывается на стороне шин 6(10) кВ по сопротивлению питающей энергосистемы и сетевого трансформатора. В качестве расчетной принята типовая схема электроснабжения насосной станции 10 кВ (рис. 1). Основное допущение: мощность питающей энергосистемы 110 кВ принимается неограниченной.

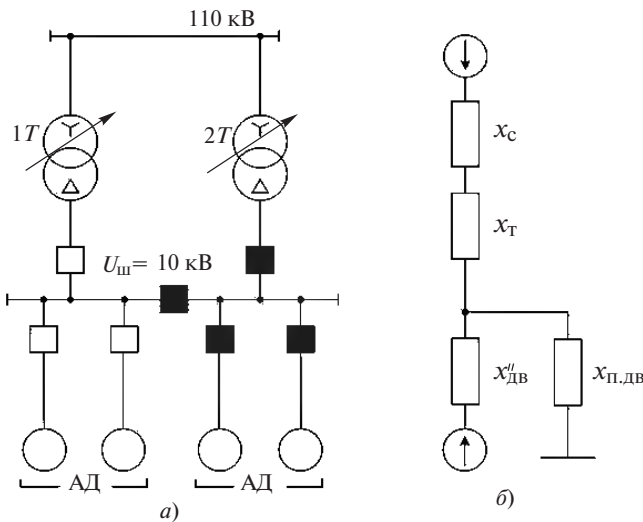


Рис. 1. Пример типовой схемы электроснабжения насосной станции с АД: а – принципиальная; б – расчетная схема замещения

Сопротивление питающей системы на ступени высокого напряжения приводится к напряжению на шинах подключения двигателя

$$x_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} I_k^{(3)}} \frac{U_{ш}^2}{U_c^2} \frac{\delta^2}{\delta}, \quad (1)$$

где  $I_k^{(3)}$  – ток трехфазного короткого замыкания по паспорту энергосистемы;  $U_{ш}$  – напряжение на шинах;  $U_c$  – напряжение питающей сети [4].

Сопротивление силового трансформатора на нижней ступени напряжения

$$x_T = \frac{U_k \% U_{ш}^2}{100 S_T}, \quad (2)$$

где  $U_k \%$  – напряжение короткого замыкания в процентах по паспорту трансформатора;  $S_T$  – мощность трансформатора [4].

Пусковое сопротивление двигателя

$$x_{п.дв} = \frac{1}{k_{п.т}} \frac{U_{дв.н}^2}{S_{дв.н}} \frac{U_{ш}^2}{U_{дв.н}^2} \frac{\delta^2}{\delta}, \quad (3)$$

где  $k_{п.т}$  – кратность пускового тока двигателя по паспорту на двигатель;  $U_{дв.н}$  – номинальное напряжение двигателя;  $S_{дв.н}$  – полная номинальная мощность двигателя.

Расчет пускового тока двигателя с учетом суммарного сопротивления элементов сети, входящих в токовую цепь, соединяющую выводы двигателя и системы неограниченной мощности,

$$I_{пуск} = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3}(x_c + x_T + x_{п.дв})}. \quad (4)$$

Остаточное напряжение на шинах и выводах электродвигателя при пуске

$$U_{ост} = \sqrt{3} x_{п.дв} I_{пуск}. \quad (5)$$

Провал напряжения на шинах

$$DU \% = \frac{(U_{ш} - U_{ост})}{U_{ш}} 100\%. \quad (6)$$

Пуск второго двигателя при работающем первом в соответствии с теоремой об активном двухполюснике целесообразно представить как результат наложения двух режимов: выделенная ветвь пускаемого двигателя разомкнута, ток  $I_{пуск} = 0$ , а напряжение на зажимах ветви определяется действием всех источников активного двухполюсника, т.е. системы и работающего в нормальном режиме соседнего двигателя; в схеме действует только один источник  $U_{ш}$ , при этом предполагаем, что трансформатор обеспечивает напряжение на шинах, которое является для ветви подключаемого двигателя напряжением холостого хода.

Работающий соседний двигатель вводится в схему замещения сверхпереходным сопротивлением

$x'_{дв} = \frac{1}{k_{п.т}} \frac{U_{дв.н}^2}{S_{дв.н}} \frac{U_{ш}^2}{U_{дв.н}^2} \frac{\delta^2}{\delta}$ . Ток пускаемого двигателя

$$I_{пуск} = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3}(x_{вх} + x_{п.дв})}, \quad (7)$$

где  $x_{вх} = \frac{1}{\frac{1}{x_c} + \frac{1}{x_T + x'_{дв}}}$

Для найденного в (7) пускового тока по (5) и (6) рассчитываются провалы напряжения.

Аналогично рассчитывается пуск третьего двигателя при работающих двух и т.д. Исследования показали, что самым тяжелым режимом для систе-

мы электроснабжения является пуск первого АД, провал напряжения при пуске следующего уменьшается ориентировочно на 3–5%. Физически это можно объяснить изменением скорости работающего двигателя при его выбеге и малым запасом кинетической энергии для подпитки пускаемого двигателя.

В случае синхронных двигателей расчетная схема станции представлена на рис. 2.

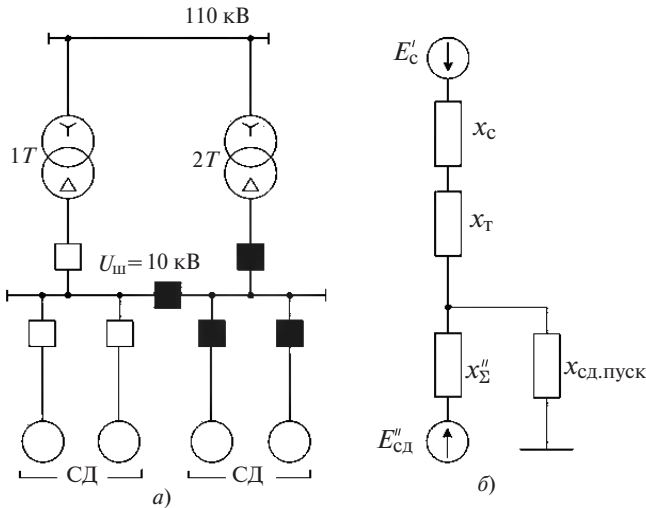


Рис. 2. Пример типовой схемы электроснабжения насосной станции с СД; а – принципиальная; б – расчетная схема замещения

Основным способом включения синхронных двигателей в сеть является их асинхронный пуск. Процесс асинхронного пуска состоит из двух этапов: разбега машины до подсинхронной скорости и непосредственной синхронизации (втягивание в синхронизм после подачи возбуждения). Поэтому расчеты провала напряжения для пуска первого СД аналогичны (1)–(6).

Синхронные электродвигатели, подключенные к шинам подстанции и работающие в нормальном режиме, при пуске соседнего двигателя участвуют в подпитке запускаемого двигателя, переходя в генераторный режим. Они вводятся в схему замещения сверхпереходным сопротивлением  $x_{\Sigma}''$  и сверхпереходной ЭДС  $E_{\Sigma}'' = \sqrt{(U_{сд} \cos j_{сд})^2 + (U_{сд} \sin j_{сд} + x_{\Sigma}'' I_{сд})^2}$ , которая в первый момент пуска сохраняет свое предшествующее значение; сопротивление  $x_{\Sigma}''$  приводится в паспортных данных СД [2].

Ветвь нормально работающих СД при определении пускового тока и провала напряжения складывается параллельно с ветвью системы и, принимая результирующую ЭДС всех двигателей равной напряжению  $U_{ш}$ , определяется пусковой ток с учетом влияния двигателей:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{3} \frac{E_{\Sigma}''}{E_{\Sigma}''} (x_c + x_T) x_{\Sigma}'' + x_{\text{сд.пуск}}}, \quad (8)$$

где  $x_{\Sigma}''$  – суммарное сверхпереходное сопротивление работающих СД.

Для найденного в (8) пускового тока по (5) и (6) рассчитывается провал напряжения.

Исследования показали, что самым тяжелым режимом для системы электроснабжения является асинхронный пуск первого СД, а провал напряжения при пуске следующего СД уменьшается на 10–15%, но только при номинальном значении  $\cos j$  работающего СД. Уменьшение провала напряжения при пуске следующего двигателя объясняется изменением угла нагрузки  $\varphi$  работающего двигателя и его переходом в генераторный режим.

Для детального изучения пусковых режимов и оценки значения остаточного напряжения на шинах подстанции использовалась классическая модель СД с электромагнитным возбуждением и массивным гладким ротором [3], в схему замещения введены найденные по (1) и (2) сопротивления  $x_c$  и  $x_T$  (рис. 3).

Расчет провала напряжения на математической модели состоит в том, что при найденном токе  $I_1(t)$  в схеме (рис. 3) выделяется падение напряжения на трансформаторе и внешней системе по найденным сопротивлениям, т.е. в соответствии со 2-м зако-

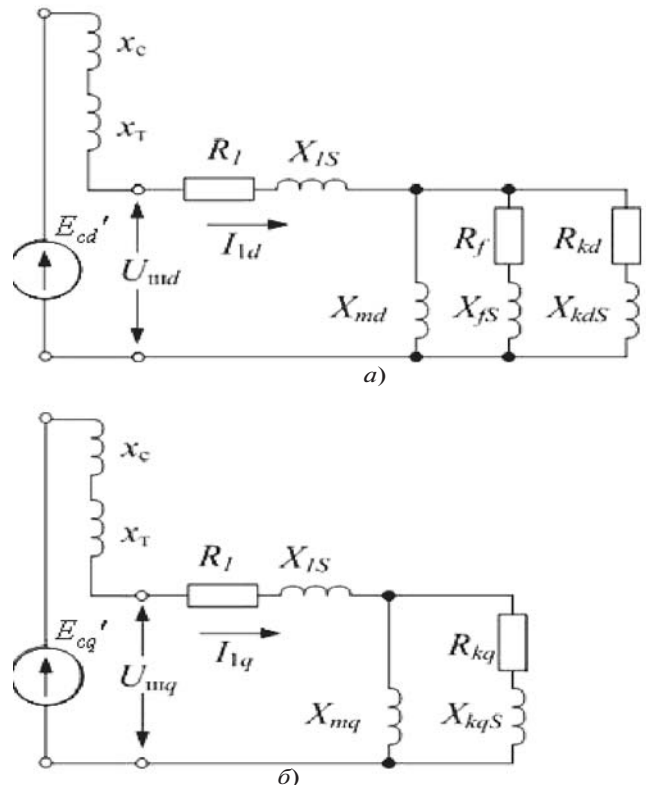


Рис. 3. Схема замещения СД с электромагнитным возбуждением и массивным гладким ротором: а – по продольной оси ротора d; б – по поперечной оси ротора q

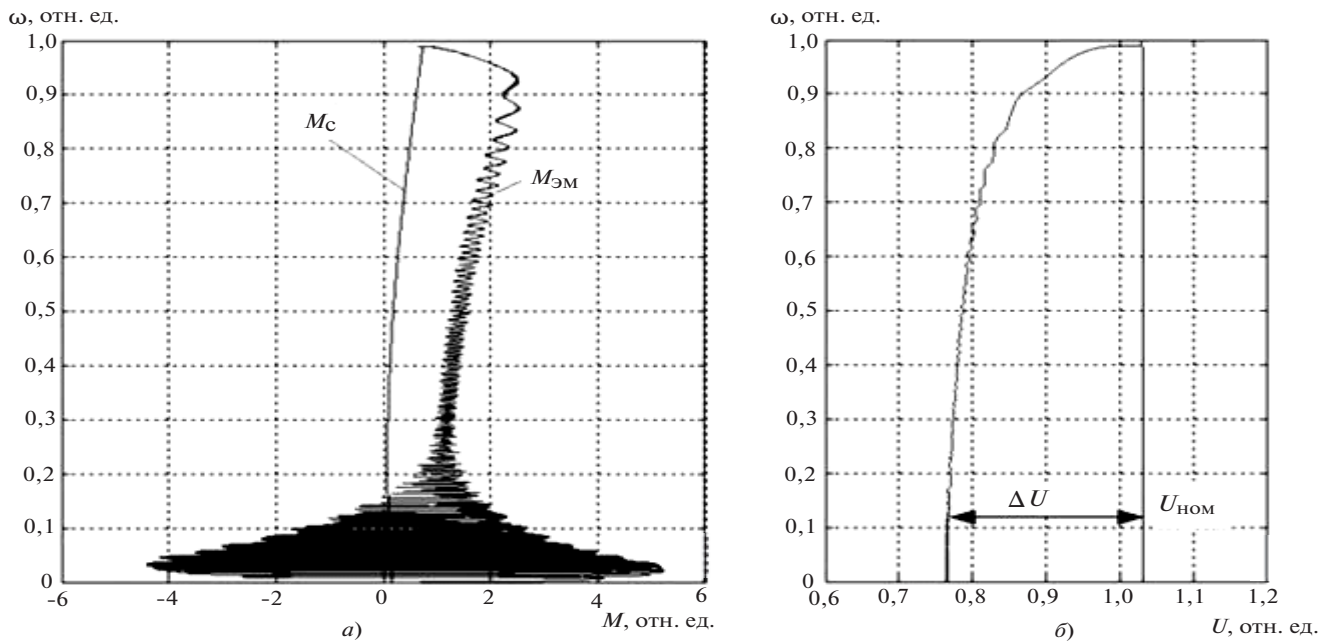


Рис. 4. Прямой пуск СД от трансформатора мощностью, равной  $3S_{дв}$ : а – электромагнитный момент  $M_{ЭМ}$  и момент сопротивления  $M_С$ ; б – провал напряжения при пуске  $\Delta U$

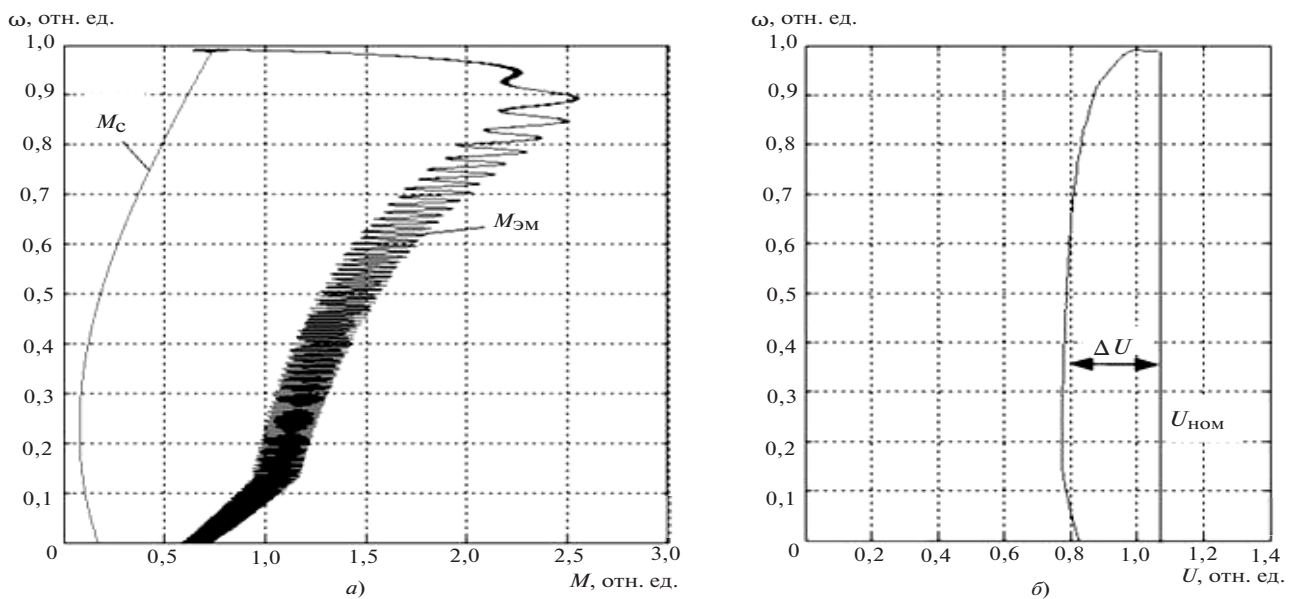


Рис. 5. Пуск СД от УПП при изменении напряжения во времени от трансформатора мощностью, равной  $3S_{дв}$ : а – электромагнитный момент  $M_{ЭМ}$  и момент сопротивления  $M_С$ ; б – провал напряжения при пуске  $\Delta U$

ном Кирхгофа  $U_{ш}(t) = E\zeta(t) - (L_T + L_C) \frac{dI_1}{dt}$ , где  $L_T$  и  $L_C$  – индуктивности трансформатора и питающей системы.

Результаты расчета пускового провала напряжения на математической модели при прямом пуске и от УПП представлены на рис. 4 и 5.

Традиционные методы уменьшения ударных нагрузок при пусках электродвигателей базируются на выборе устройства плавного пуска (УПП), которые в той или иной степени решают задачу ограни-

чения пускового тока, уменьшая тем самым провал напряжения. Однако при выборе УПП следует иметь в виду, что динамический момент должен быть положительным за все время пуска, так как это является гарантией выхода двигателя на номинальную скорость. По существу все УПП изменяют естественную пусковую характеристику двигателя за счет формирования необходимого закона подаваемого напряжения. К примеру, семейство характеристик в относительных единицах для пуска с токовой отсечкой изображено на рис. 6.

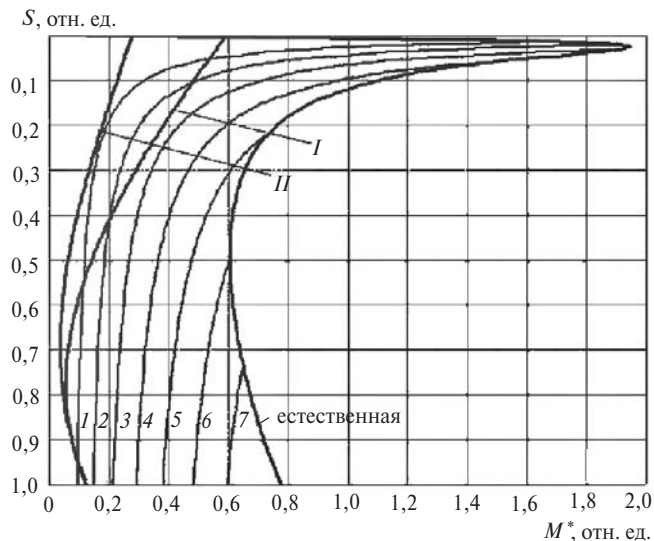


Рис. 6. Семейство характеристик  $M^* = f(s, U^*)$  АД при токовой отсечке: 1 —  $2I_n$ ; 2 —  $2,5I_n$ ; 3 —  $3I_n$ ; 4 —  $3,5I_n$ ; 5 —  $4I_n$ ; 6 —  $4,5I_n$ ; 7 —  $5I_n$ ; I — нагрузочная характеристика на открытую задвижку; II — на закрытую

Естественные пусковые характеристики двигателя пересчитываются на токовые отсечки (рис. 6)

с учетом зависимостей  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1}{U_2}$  и  $\frac{M_1}{M_2} = \frac{\alpha U_1}{\xi U_2} \frac{\ddot{\phi}^2}{\phi}$  по

заданному значению токовой отсечки [1]. Из рис. 6 нетрудно заметить, что при токовой отсечке  $2I_n$  пуск невозможен, а при  $2,5I_n$  двигатель не достигнет номинальной скорости при пуске на открытую задвижку. Оптимальная токовая отсечка для успешного пуска на открытую задвижку составляет  $3I_n$ , т.е. найден пусковой ток  $I_{\text{пуск}} = 3I_n$ , служащий основой для расчета провала напряжения по формулам (5)–(6) с применением УПП.

Таким образом, если значение токовой отсечки в УПП близко кратности пускового тока АД, то задача безударного пуска и уменьшения провала на-

пряжения решается применением преобразователя частоты. Однако, если при асинхронном пуске СД в многодвигательной системе в работе постоянно находится хотя бы один СД, то провалы напряжения при пусках следующего могут удовлетворять требованиям регламента.

Замена питающего трансформатора на большую мощность, хотя и обеспечит допустимый провал напряжения, но не избавит двигатели от ударных токов.

Отдельно следует сказать, что резерв освобожденной мощности трансформатора при ограничении пускового тока может служить экономическим обоснованием окупаемости УПП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелян А.К., Ларионов В.Н. Электропривод насосов: вопросы теории и расчета: Учебное пос. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та им. И.Н. Ульянова, 2008.
2. Гамазин С.И., Понаровкин Д.Б., Цырук С.А. Переходные процессы в электродвигательной нагрузке систем промышленного электроснабжения. — М.: Изд-во МЭИ, 1991.
3. Донской Н.В. Регулируемые электроприводы переменного тока. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2007.
4. Шедрин В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2007.

[11.11.10]

Авторы: Аракелян Александр Карпетович окончил энергетический факультет Азербайджанского индустриального института им. М. Азизбекова в 1953 г. Профессор кафедры систем автоматического управления электроприводами Чувашского государственного университета (ЧГУ) им. И.Н. Ульянова.

Калинин Алексей Германович окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2007 г. Аспирант кафедры систем автоматического управления электроприводами ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

\* \* \*

### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.