

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-102-115

УДК 621.311.22.004.14: 621.313.333.001.5

ББК 31.16: 326.3291.63

А.Ш. МАДЖИДОВ, Ю.П. ГУСЕВ

## МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

**Ключевые слова:** эквивалентирование, асинхронный двигатель, собственные нужды, короткое замыкание, система дифференциальных уравнений, моделирование, программа ETAP.

При коротком замыкании в электроустановках собственных нужд электростанций существенное влияние на характер процесса и величину тока короткого замыкания оказывают трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В системе собственных нужд необходимо учитывать составляющие тока короткого замыкания от асинхронных двигателей при выборе и проверке выключателей, а также при выборе и проверке токоведущих частей (кабелей, комплектных токопроводов, и др.) не только в начальный момент короткого замыкания, но и к моменту его отключения. Методы расчета тока короткого замыкания с учетом влияния асинхронных двигателей продолжают совершенствоваться, осуществляется поиск новых методов, максимально упрощающих расчеты при сохранении достоверности результатов. При этом некоторые вопросы требуют дополнительного изучения и исследований, например, возможность эквивалентирования асинхронных двигателей. На электростанциях приходится учитывать составляющие тока короткого замыкания от большого количества асинхронных двигателей, что не только трудоемко, но иногда и невозможно из-за отсутствия полной информации по двигателям и механизмам собственных нужд. Для повышения эффективности и точности расчетов для задач проектирования электростанций целесообразно группы асинхронных двигателей заменять их эквивалентами. Актуальность совершенствования метода эквивалентирования асинхронных двигателей электростанций возрастает вместе с повышением требований к усилению надежности электроустановок собственных нужд электростанций и снижению затрат на обеспечение технических запасов, обусловленных погрешностями расчетов. В статье рассматривается метод эквивалентирования группы низковольтных асинхронных двигателей на примере системы собственных нужд ТЭЦ №1 г. Душанбе Республики Таджикистан. Моделирование электромеханических процессов, вызванных короткими замыканиями разной электрической удаленности, осуществлялось с помощью программного комплекса ETAP (компания OTI, США).

**Введение.** Для привода механизмов собственных нужд (СН) электростанций в основном используются асинхронные двигатели, что связано с их высокой надежностью, экономичностью, сравнительно небольшой стоимостью и простотой в эксплуатации. Электропривод значительно упрощает автоматизацию технологического процесса на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС). Тип, параметры и характеристики двигателей должны соответствовать характеристикам механизмов собственных нужд (СН), требованиям к регулированию их производительности, режимам работы, особенно в условиях продолжительной работы. Для привода основных механизмов станций применяют двигатели трехфазного переменного тока – асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. АД с фазным ротором не применяют в системе СН ЭС и ПС ввиду малой надежности и трудности их самозапуска после перерыва питания [9, 10, 15, 16].

Обычно количество АД, подключенных к каждой секции напряжением 0,4 кВ системы СН, достигает 10–20 единиц, и при переходных процессах (ПП) учет влияния каждого АД приводит к необходимости расчета режимов в многомашинной системе [10]. При моделировании ПП система дифференциальных уравнений Парка–Горева всегда считалась наиболее правильной, но, к сожалению, параметризация такой модели приводит к большим затратам времени на поиск и ввод параметров оборудования СН. Эквивалентирование группы АД позволяет снизить затраты времени на параметризацию расчетных моделей для ПП [9].

Для ненулевых моментов времени процесса короткого замыкания расчет параметров режима работы АД в СН считается сложным, так как поведение АД обусловлено взаимовлиянием АД друг с другом и с остальным оборудованием СН ЭС и ПС. Совершенствование моделей АД позволяет более глубоко исследовать и объяснять физические основы процессов, а также снижать затраты на моделирование [4]. Изучение ПП необходимо проводить, принимая во внимание каждый элемент с точки зрения учета его математической модели, особенно при большом их вкладе в ход электромагнитного и электромеханического ПП в системе СН.

Традиционный метод выполнения расчета ПП приемлем тогда, когда возникает вопрос об уточнении влияния АД с помощью решения их дифференциальных уравнений. При выполнении таких расчетов есть возможность учесть многие факторы, которые приводят к увеличению порядка системы дифференциальных уравнений [4, 15]. Уменьшить порядок системы дифференциальных уравнений и упростить расчет можно путем замены группы АД одним эквивалентным АД. Такой метод всегда целесообразно использовать, если несколько АД присоединены к одной секции системы СН. Во многих случаях группу АД заменяют эквивалентным АД, у которого номинальная мощность равна суммарной мощности группы АД, а другие параметры, такие как номинальное скольжение, коэффициент мощности, кратность максимального момента и коэффициент загрузки, подбирают индивидуально. Авторы [9, 16] рассматривают расчеты ПП и методы эквивалентирования применительно к группе высоковольтных АД в основном с напряжением 6 кВ, имеющих одинаковые каталожные параметры. В работах [1–4, 6, 10–12, 14–18] рассматривается метод эквивалентирования АД высоковольтных АД большой мощности, как правило, сотни киловатт и более. К сожалению, эквивалентированию низковольтных АД не уделяется достаточного внимания. Без эквивалентирования низковольтных АД и расчета ПП токи короткого замыкания (ТКЗ) в системе СН оказываются неоправданно завышенными и выбираемые на их основе кабели и электрооборудование более дорогими [19].

**Задача исследования** – определение суммарных токов в месте повреждения с учетом влияния АД на начальной стадии короткого замыкания. Авторы работ [1–4, 6, 10–12, 14–18] считают, что для эквивалентирования АД следует использовать АД с близкими характеристиками и параметрами. В этих работах используются методы, суть которых отражена на рис. 1.

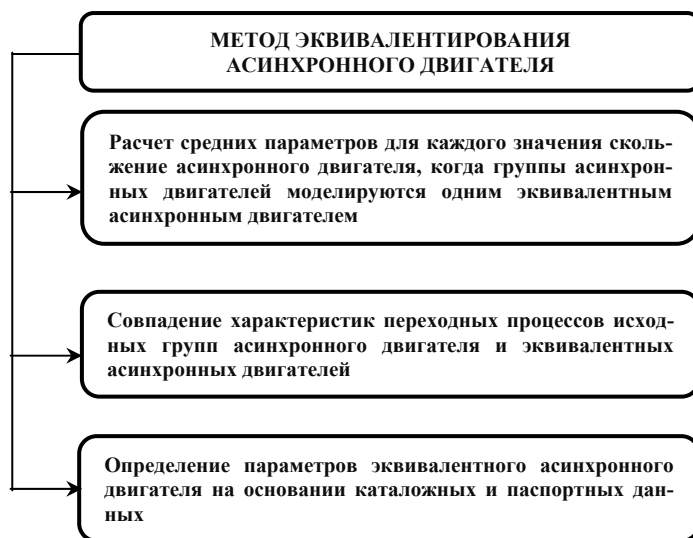


Рис. 1. Метод эквивалентирования асинхронного двигателя

Для эквивалентирования низковольтных АД СН предлагается все АД, присоединенные к секции шин 0,4 кВ СН, разделить на группы, близкие по характеристикам и по назначению механизмов. Каждая группа замещается эквивалентным АД. При эквивалентировании следует учитывать только гальванически связанные АД.

При эквивалентировании АД основным допущением метода является близость скольжений роторов АД исходной группы в ПП для одних и те же моментов времени. Такие допущения накладывают определенные ограничения на рассчитываемые электромеханические ПП. Например, расчет каскадного самозапуска АД в многомашинных системах приведет к значительному неравенству скольжений при ПП, что существенно влияет на характер протекания ПП [20].

Целью настоящей работы является разработка метода эквивалентирования низковольтных АД СН при ПП с использованием математического моделирования на базе программы ETAP (Electrical Transient Analyzer Program company in USA) [13], позволяющего определить параметры схемы замещения эквивалентных АД по исходным каталожным данным. Также предлагается метод определения токов КЗ каждого АД из группы без решения дифференциальных уравнений [19,20].

Исследования выполнялись для группы АД в системе СН ЭС на примере действующих агрегатов VIII секции 0,4 кВ СН ТЭЦ №1 г. Душанбе Республики Таджикистан [5], которая снабжается от КРУ–6 кВ V секции через трансформатор СН №8 типа ТС-750/10 с номинальной мощностью 750 кВА, напряжением 6,3/0,4 кВ, группой соединения  $Y/Y-12$  током холостого хода 2,5%, потерями холостого хода 4,9 кВт и потерями КЗ – 8,8 кВт, напряжением КЗ – 7,6%. Основные каталожные данные низковольтных АД VIII секции 0,4 кВ СН приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Каталожные данные низковольтных АД VIII секция СН

Механизмы СН	СНТГ 7А	КЭН 3В	КЭН 6В	КЭН 8В	ПНТС 4А	АМН ТГ7	ПМН ТГ7	ПЭН 7В	МНС 7А
Тип АД	АО2-72	АО2-82	АО2-82	АО2-82	А2-82	АО2-71	А3-315М	АО2-71	АО2-92
$P_{ном}, кВт$	30	75	75	75	75	22	100	22	100
$S_{ном}, кВА$	32,97	80,65	80,65	80,65	83,33	24,44	111,11	24,44	108,70
$I, А$	56	135	135	135	135	75	160	75	180
$k_s$	0,81	0,82	0,82	0,82	0,84	0,81	0,87	0,81	0,9
$n, об./мин$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
$\cos\varphi$	0,91	0,93	0,93	0,93	0,9	0,9	0,9	0,9	0,92
$\eta, \%$	91	90	90	90	92	88	92	88	93
$b_m$	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	2,1	2,2	2,3
$s, \%$	2,5	2,4	2,4	2,4	2,5	2,7	3,0	2,7	3,0
$\omega_{p,i}$	0,05	0,13	0,13	0,13	0,13	0,04	0,17	0,04	0,17
$\omega_{s,i}$	0,05	0,13	0,13	0,13	0,13	0,04	0,17	0,04	0,17

В соответствии с сформулированной выше целью в данной работе решаются следующие задачи:

- анализ и выбор метода расчета параметров схемы замещения АД;
- разработка метода эквивалентирования группы АД;
- разработка модели расчета в программном комплексе ЕТАР;
- исследование влияние группы АД на ТКЗ при различных видах повреждения в системе СН и разной электрической удаленности;
- разработка метода определения ТКЗ в системах СН без решения систем дифференциальных уравнений с разными электрическими удаленностями, которая основывается на эквивалентировании группы АД и их переходных функций.

**1. Расчетно-теоретическая часть.** В системе СН при ПП, особенно вызванных КЗ, наибольшее влияние на характер процесса и величину тока оказывает группа АД, которая непосредственно через элементы, имеющие малые электрические сопротивления, связана с местом КЗ [19].

Для практических расчетов погрешность определения суммарных ТКЗ не должна превышать 20% на интервале времени до 0,5 с, что соответствует стандартному разбросу параметров срабатывания автоматических выключателей и времени отключения КЗ. Изменение скольжения АД с типовыми значениями постоянной времени механической инерции агрегатов СН до отключения КЗ обычно превышает 20%, что требует учета изменения параметров АД, отражающих эффект вытеснения тока в обмотках АД. Данный эффект при преобразовании схемы замещения учитывается с помощью многоконтурной схемы замещения АД. Для иллюстрации эффекта рассмотрен расчет результирующего тока трехфазного КЗ группы АД СН, состоящей из девяти АД, которые работают в системе СН напряжением 0,4 кВ. Предполагается, что в обмотках статора АД и в их цепях дополнительные сопротивления отсутствуют. К АД прикладывается номинальное напряжение. Входная проводимость каждого АД со стороны статора [6]

$$y(js) = \frac{1}{x(js)}, \tag{1}$$

где  $x(js)$  – входное активное сопротивление со стороны обмотки статора, зависящее от скольжения ротора АД.

Из выражения (1) получается результирующая проводимость эквивалентного АД. Исходя из проводимости эквивалентного АД и номинальных токов исходных АД определяются проводимости отдельных АД

$$y_{\Sigma j_s} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k I_{\text{ном.}k}}{\sum_{k=1}^n I_{\text{ном.}k}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{ном.}k}$  – номинальный ток  $k$ -го АД;  $n$  – количество АД.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема замещения эквивалентного АД с ветвями намагничивания [6].

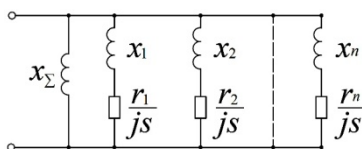


Рис. 2. Схема замещения группы АД

Активное сопротивление обмотки статора эквивалентного АД отражает совокупность схем замещения каждого АД по отдельности. Уточнение сопротивления обмоток ротора и учет их нелинейности являются важной задачей при эквивалентировании группы АД с учетом эффекта вытеснения тока в обмотках АД, представляемых в виде многоконтурной схемы замещения. Именно это дает возможность определять параметры всех ветвей схемы замещения по отдельным контурам, особенно по экспериментальным или расчетным частотным характеристикам. Необходимо отметить, что группы АД всегда эквивалентруются с использованием алгоритма, учитывающего влияние отдельных контуров, и определяют параметры схемы замещения на основе любого числа эквивалентруемых контуров [1–4, 6, 10–12, 14–18]. При эквивалентировании АД напряжением 0,4 кВ необходимо учитывать внешние индуктивные и активные сопротивления в цепях статоров эквивалентруемых АД, используя уравнение (2).

Эквивалентирование группы АД усложняется при наличии общих внешних активных и индуктивных сопротивлений. Учет сопротивлений кабельных линий и питающих трансформаторов предлагается в работе [10] с помощью суммирования токов каждого из эквивалентруемых АД. Эквивалентное значение внешнего сопротивления  $x_{\text{вн}}^{\text{экв}}$  и  $r_{\text{вн}}^{\text{экв}}$  можно определить по выражению (2). Учесть дополнительные сопротивления в статорной цепи можно более точно с помощью суммарного тока КЗ с использованием следующего выражения [6]:

$$y_{r_{\Sigma j_s}} = \frac{1}{\frac{1}{y_{r_{\Sigma j_s}}} + x_{\Sigma} + \frac{r_{\Sigma}}{j}}, \quad (3)$$

где  $y_{\Sigma j_s}$  – характеристика эквивалентного АД, рассчитываемая по (1);  $r_{\Sigma}$  и  $x_{\Sigma}$  – суммарные активное и индуктивное сопротивления для группы АД.

Результирующее активное сопротивление в цепи статора эквивалентного АД рассчитывается по выражению (3) и определяется как суммарный ток КЗ от группы АД, которые связаны с точкой КЗ общим внешним сопротивлением. В общем случае система дифференциальных уравнений одного АД во многих случаях не дает точного решения из-за неучета общей системы дифференциальных уравнений группы АД [20].

Для расчета ПП, особенно при КЗ, часто применяется метод контурных токов. Метод узловых напряжений используется для определения напряжений в различных узлах [13]. При таком раскладе проблемы численной устойчивости решения системы дифференциальных уравнений возникают во время режима работы многомашинных систем. Анализируемый метод дает возможность определить токи в цепи каждого АД. Поэтому по выражению (3) рассчитываются параметры эквивалентных АД с учетом внешних сопротивлений  $\gamma_{\Sigma js}$  посредством использования добавочных коэффициентов:

$$y_{rk_{js}} = y_{r\Sigma js} \cdot C_{k_{js}}, \quad (4)$$

где  $C_{k_{js}}$  – добавочные коэффициент  $k$ -го АД.

Следующее соотношение показывает вклад в суммарный ток каждого АД по рассматриваемым методам:

$$C_{k_{js}} = \frac{y_{kr_{js}}}{y_{r\Sigma js}}. \quad (5)$$

Во время расчета периодической составляющей тока КЗ с учетом момента времени допустимо использование метода типовых кривых, отражающих отношение тока АД в произвольный момент времени к начальному значению тока КЗ с учетом электрической удаленности точки КЗ. Формулы (2) и (3) позволяют оценить изменение тока каждого АД во времени. Такие кривые считаются типовыми, а не расчетными [4, 10].

Такие ученые, как И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.Х. Георгиади, М.Н. Околович, В.Ф. Сивокобыленко, В.В. Жуков, разработали практические методы расчета токов КЗ, учли влияние АД на токи КЗ. В работах [1–4, 7, 11–17] изложены методы расчетов тока КЗ на основании теоретических и экспериментальных исследований с учетом влияния групп АД на токи КЗ при выборе проводников и аппаратов. Способ определения параметров схемы замещения эквивалентного АД, предложенный авторами [1–4, 7, 11–17], показывает возможность замены группы АД на эквивалентные АД с сохранением приемлемой для практических расчетов точностью.

По результатам исследований, представленных в работ [9, 10, 15], метод эквивалентирования результативен в случае, если требуется в краткие сроки выполнить серию однотипных расчетов для исследования ПП в электроустановках с АД. С помощью предлагаемого метода определяются эквивалентные АД на основе приближенного математического расчета ПП при КЗ в многомашинных системах СН. Ранее было принято, что во время эквивалентирования при КЗ присутствовала осциллограмма натурального эксперимента в узле, к которому подключен АД. Это нужно было для того, чтобы оценить поведение системы электроснабжения с группой АД. В современных условиях благодаря доступности апробированных методов расчета и компьютерных про-

грамм, например, таких, как программа ЕТАР, можно не проводить натурные эксперименты, а ограничиться расчетно-теоретическим исследованием. Результаты выполненной и представленной в данной статье работы подтверждают такую возможность. Основы расчета, базирующегося на эквивалентировании групп АД СН, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Математические выражения для эквивалентирования АД СН

Название физической величины	Формула	Расчетные данные	Обозначение величин, входящих в формулу
Активная мощность эквивалентируемого АД, кВт	$P_{\text{ном.э}} = \sum_{j=1}^n P_{\text{ном.}j}$	574	$\sum P_{\text{ном.}j}$ – номинальная активная мощность $j$ -го АД, кВт
Полная мощность эквивалентируемого АД, кВА	$S_{\text{ном.э}} = \sum_{j=1}^n S_{\text{ном.}j} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{\text{ном.}j}}{\cos\varphi_{\text{ном.}j}}$	627	$\sum S_{\text{ном.}j}$ – номинальная полная мощность $j$ -го АД, кВА; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности АД
Коэффициент мощности эквивалентируемого АД	$\cos\varphi_{\text{ном.э}} = \frac{P_{\text{ном.э}}}{S_{\text{ном.э}}}$	0,91	$P_{\text{ном.э}}$ – активная мощность эквивалентируемого АД, кВт; $S_{\text{ном.э}}$ – полная мощность эквивалентируемого АД, кВА
Коэффициент загрузки эквивалентируемого АД	$k_{\text{з.э}} = \sum_{j=1}^n k_{\text{з.}j} \cdot \omega_{\text{р.}j}$	0,83	$k_{\text{з.}j}$ – коэффициент загрузки $j$ -го АД; $\omega_{\text{р.}j}$ – весовой множитель $j$ -го АД
Весовой множитель по активной мощности эквивалентируемого АД	$\omega_{\text{р.}j} = \frac{P_{\text{ном.}j}}{P_{\text{ном.э}}}$	0,11	$P_{\text{ном.}j}$ – номинальная активная мощность $j$ -го АД, кВт; $P_{\text{ном.э}}$ – активная мощность эквивалентируемого АД, кВт
Кратность максимального момента эквивалентируемого АД	$b_{\text{м.э}} = \sum_{j=1}^n b_{\text{м.}j} \cdot \omega_{\text{р.}j}$	2,2	$b_{\text{м.}j}$ – максимальный момент $j$ -го АД; $b_{\text{м}} = M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$
Номинальное скольжение эквивалентируемого АД, %	$s_{\text{ном.э}} = \sum_{j=1}^n s_{\text{ном.}j} \cdot \omega_{\text{с.}j}$	2,6	$s_{\text{ном.}j}$ – номинальное скольжение, %; $\omega_{\text{с.}j}$ – весовой множитель
Весовой множитель по полной мощности эквивалентируемого АД	$\omega_{\text{с.}j} = \frac{S_{\text{ном.}j}}{S_{\text{ном.э}}}$	0,11	$S_{\text{ном.}j}$ – номинальная полная мощность $j$ -го АД, кВА; $S_{\text{ном.э}}$ – полная мощность эквивалентируемого АД, кВА

**2. Математическая модель программы ЕТАР и ее верификация.** Исследование статических и динамических режимов АД осуществляется методом математического моделирования на основе решения системы полных дифференциальных уравнений [4, 6, 16]. Моделирование ПП с помощью программного обеспечения ЕТАР происходит аналитическим образом, как отмечают авторы [1–4, 7–9, 11–17]. Традиционный подход при наличии группы АД с использованием дифференциальных уравнений, особенно на основе многоконтурных схем замещения роторов, испытывает известные трудности [4, 7, 17].

Метод контурных токов иногда используется при моделировании расчета ПП в каждом АД по отдельности, но при определении метода узловых напряжений в отдельных точках чаще используется для определения самого напряжения.

В [16] описано возникновение проблемы численной устойчивости и даются рекомендации по решению системы дифференциальных уравнений.

Авторы [6, 17] на основе тщательного исследования предлагают новый подход к математическому моделированию многомашинных систем, на основе аналитического описания электромагнитного ПП. Предложенный метод дает возможность рассчитать в обмотке статора отдельного АД ток с учетом влияния гальванически связанных с ним других АД. При реализации предложенного метода используются коэффициенты токораспределения, вычисляемые на основе характеристик каждого АД по отдельности путем преобразования схемы замещения. При этом учитываются взаимные влияния АД и внешние сопротивления. Данный метод обеспечивает учет непосредственной связи между всеми АД через общее сопротивление ветви КЗ. Данное преобразование использует реальные и простые характеристики АД, так как имеет схожие характеристики ЭДС для всех АД в процессе преобразования схем замещения АД в системе СН. Именно эти простые характеристики дают возможность описывать одинаковые уравнения для каждого АД независимо друг от друга. Определения токов в каждом АД осуществляется при реализации численного метода решения системы дифференциальных уравнений. Следовательно, метод определения токов в каждом из группы АД не требует увеличивать порядок системы дифференциальных уравнений.

В работах [7, 10, 14, 16], посвященных исследованию влияния АД на токи КЗ, разработаны, усовершенствованы и уточнены методы их учета. В некоторых работах встречается разработка методов эквивалентирования АД. Нужно отметить, что в этих работах группы АД представляются в виде эквивалентного АД, но их параметры берутся из приближенных расчетов. Расчетные кривые тока от АД, которые имеют рекомендованный характер, не считаются универсальными, так как с помощью этих кривых КЗ на выводах АД получается в результате приближенного расчета на основе усредненных параметров АД. Эти расчеты ведутся для одной серии АД, но по ней оцениваются характеристики других АД.

Приведенный анализ расчетов КЗ с учетом АД с применением алгоритмов эквивалентирования показывает, что известные методы имеют такие недостатки, как неправильный учет вытеснения тока в обмотках АД, погрешности определения параметров эквивалентных АД, неучет шунтирующего эффекта АД на стадии КЗ, предшествующей его отключению, погрешности учета электрической удаленности, неучет гальванической связи между АД через общее сопротивление при эквивалентировании, ошибки распределения эквивалентруемых АД по группам с учетом параметров механизмов.

Для подтверждения обоснованности предлагаемого метода эквивалентирования АД СН при переходном процессе разработана математическая модель на базе программного обеспечения ЕТАР. Схема АД СН, состоящих из девяти АД, и эквивалентных АД, приведены на рис. 3, *a* и *б*, соответственно. Программа позволяет производить расчеты по полным дифференциальным уравнениям для каждого АД с последующим суммированием их токов и упрощенной системой уравнений для эквивалентных АД.



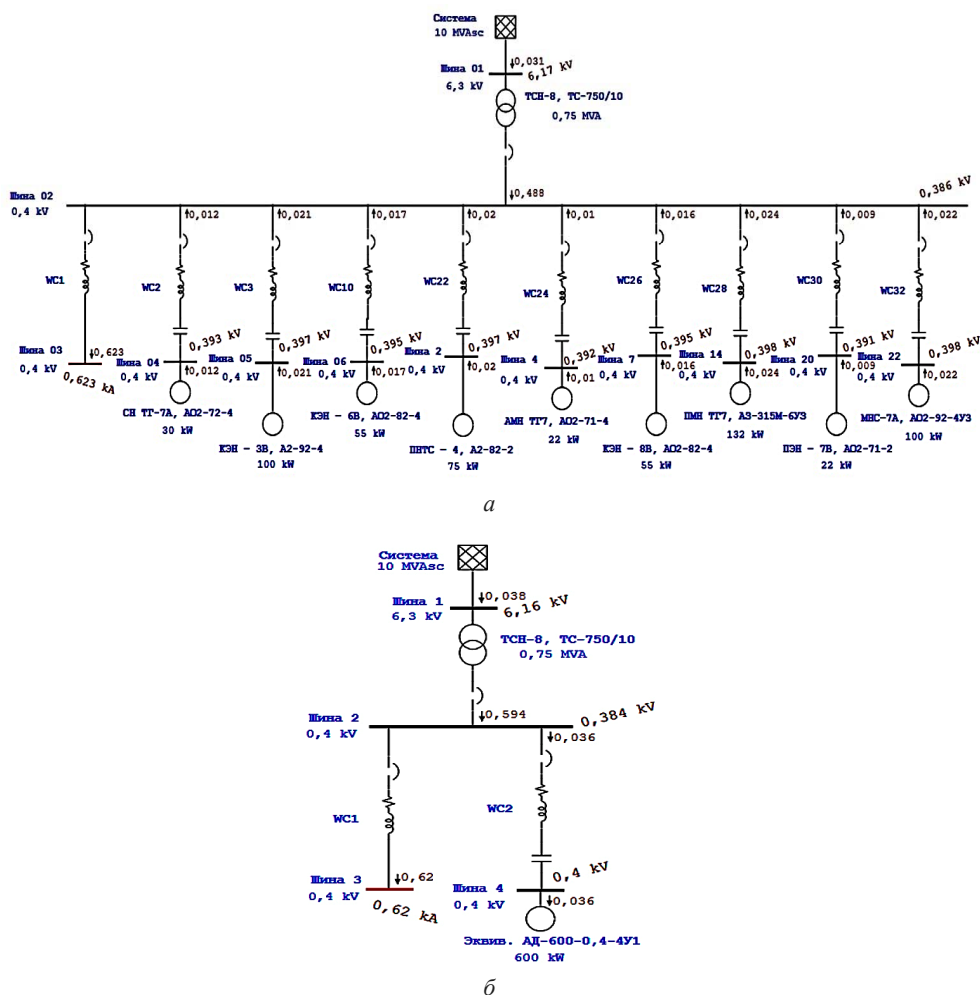


Рис. 3. Последовательные этапы эквивалентирования группы АД:  
 а – исходная схема; б – конечная схема

Эквивалентными можно считать АД СН, у которых мощность, кратность пускового тока, максимальный момент имеют мало отличающиеся значения, а параметры механизмов отличаются несущественно.

По результатам расчетов в качестве эквивалентного АД выбираем стандартный АД с короткозамкнутым ротором типа АД-600-0,4-4У1 с параметрами – номинальное напряжение 0,4 кВ, активная мощность 600 кВт, КПД 94%, коэффициент мощности 0,9 и частота вращения 1500 об./мин.

**3. Результаты моделирования и их обсуждение.** Расчет выполнен с помощью программного комплекса ЕТАР по дифференциальным уравнениям периодических составляющих тока КЗ ( $I_{nt}/I_{no}$ ) для точки  $\kappa-1$  (рис. 3, а и табл. 1) от группы АД секции. Кривая  $I_{nt}/I_{no}$  для эквивалентного АД для точки  $\kappa-1$  (рис. 3, б и табл. 2) показана на рис. 4.

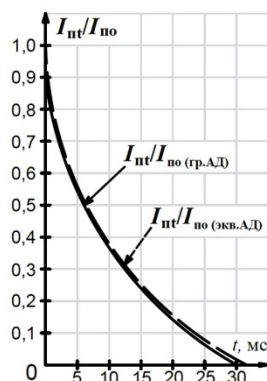


Рис. 4. Изменения периодической составляющей тока КЗ ( $I_{пт}/I_{но}$ ) во времени: сплошная кривая – для группы АД; пунктирная – для эквивалентного АД

Рис. 4 позволяет сделать вывод, что сумма периодических составляющих в токах КЗ ( $I_{пт}/I_{но}$ ) во времени отдельных АД (сплошная кривая) удовлетворительно совпадает с током эквивалентного АД (пунктирная кривая). Таким образом, исследование подтвердило высокую точность разработанного метод эквивалентирования АД и позволяет рекомендовать разработанный метод для практических расчетов КЗ. Для практического применения рекомендуются расчетные кривые  $I_{пт}/I_{но}$  [9, 10] эквивалентного АД серии АД-600-0,4. Указанные типовые кривые получены в результате расчета [9, 10] при различной электрической удаленности места КЗ.

Эквивалентная схема замещения составляется на основе исходной расчетной схемы, и ее параметры приводятся к той ступени напряжения, в которой находится точка КЗ. Все и активные, и индуктивные сопротивления измеряются в мОм. Чтобы определить ток КЗ от АД в произвольной точке расчетной схемы (рис. 3), необходимо предварительно найти удаленность до точки  $k_l$ . Удаленность точки  $k_l$  задается для отдельного АД или для эквивалентного АД, она может определяться через отношение тока в начальный момент КЗ к номинальному току:

$$I'_{по.АД} = \frac{I_{по.АД}}{I_{ном.АД}}$$

Для подтверждения достоверности эквивалентирования АД были выполнены расчеты тока КЗ от группы АД из состава VIII секции СН по данным [5]. Такие же расчеты произведены для эквивалентного АД по данным табл. 1. Полученные в результате расчета кривые изменения тока КЗ во времени практически совпадают (рис. 5).

При возникновении электрически удаленного трехфазного КЗ, в точке  $k_1$ , как показано на рис. 3, за счет кинетической энергии вращающихся частей АД в его механизме в короткозамкнутой цепи протекает ток, содержащий только свободные составляющие, и со временем он полностью затухает.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что ток статора состоит из двух затухающих свободных токов: тока  $I_n$ , изменяющегося во времени с частотой, близкой к промышленной, и тока  $I_a$ , изменяющегося по экспоненциальному закону (рис. 5).

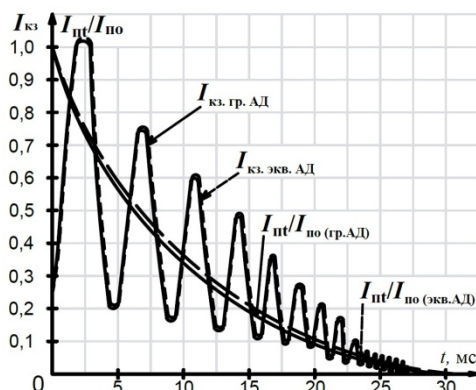


Рис. 5. Кривые тока КЗ от АД VIII секции СН:  
сплошная кривая – сумма токов отдельных АД; пунктирная – эквивалентного АД

С помощью моделирования определены начальные значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ от АД СН, эквивалентные значения постоянной времени затухания периодической составляющей тока КЗ от АД, а также параметры периодической составляющей тока трехфазного КЗ от АД СН в произвольный момент времени.

**Заключение.** В данной работе разработан и исследован метод эквивалентирования АД, предназначенный для расчета КЗ в низковольтных электроустановках собственных нужд электростанций. Определены параметры схемы замещения эквивалентного АД на основе разработанного метода. Метод проверен на примере девяти АД.

Результаты расчетов, выполненных с использованием разработанного метода, подтвердили возможность увеличения эффективности расчетов с сохранением требуемой точности их результатов. Подтверждена возможность моделирования ПП, вызванных КЗ, с использованием эквивалентирования АД в программной среде ЕТАР. Разработанный метод позволяет снизить затраты времени на параметризацию моделей для расчета КЗ в системе СН электростанций. Показано, что результаты расчетов, полученные с помощью программы ЕТАР, при моделировании группы отдельных АД и при использовании в модели одного эквивалентного АД практически совпадают, расхождение не превышает 5%.

#### Литература

1. Георгиади В.Х. Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд (части 1–3) М.: Изд-во НТФ "Энергопрогресс", 2003. 250 с.
2. Жуков В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. М.: ИД МЭИ, 2004. 192 с.
3. Жуков В.В., Крючков И.П., Неклепаев Б.Н. и др. Сравнительный анализ методов расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ // Электрические станции. 1996. № 36. С. 41–51.
4. Жуков В.В. Эквивалентирование асинхронных двигателей системы собственных нужд энергоблока // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Энергетика. 1978. № 3. С. 13–18.

5. Информация за 2020 года ОАО «Душанбинская ТЭЦ № 1». URL: <http://www.barqi-tojik.tj/about/dependents/generation/256/196292/> (дата обращения: 30.05.2020).

6. Ларин А.М., Наумов О.Е. Математическое моделирование многомашинных систем с асинхронными двигателями частотным методом. URL: <http://uchebilka.ru/matematika/155060/index.html> (дата обращения: 30.05.2020).

7. Маджидов А.Ш. Уравнения асинхронного электродвигателя при переходном процессе // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», филиал в г. Смоленске. Смоленск, 2020. С. 44–49.

8. Маджидов А.Ш. Практический расчет тока короткого замыкания с учетом влияния асинхронных электродвигателей // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», филиал в г. Смоленске. Смоленск, 2020. С. 34–38.

9. Маджидов А.Ш., Гусев Ю.П. Эквивалентирование агрегатов собственных нужд электростанций // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать шестая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (12–13 марта 2020). М., 2020. С. 1049.

10. Меджахед А., Жуков В.В. Эквивалентирование асинхронной нагрузки // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1990. № 5. С. 44–49.

11. Околович М.Н., Полевая И.В. Учет влияния асинхронных двигателей при расчете токов короткого замыкания в системе собственных нужд электростанций // Электрические станции. 1963. № 4. С. 54–60.

12. Околович М.Н. Проектирование электрических станций. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.

13. Описание программы ETAP. URL: <https://etap.com> (дата обращения: 30.05.2020).

14. Rogozin G.G., Larin A.M. Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам // Электричество. 1974. № 6. С. 10–13.

15. Rogozin G.G., Latshina N.S., Pyatlina N.G. Эквивалентирование групп асинхронных двигателей для расчета переходных процессов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1975. № 1. С. 87–93.

16. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Донецк: Изд-во РВА ДонНТУ, 2002. 136 с.

17. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Метод эквивалентирования и расчета короткого замыкания в системе асинхронных машин // Электричество. 1979. № 1. С. 45–50.

18. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование АД собственных нужд станций. Донецк: Изд-во ДПИ, 1979. 110 с.

19. Madzhidov A. Analysis of short circuit current calculation in auxiliary means of thermal power plants using ETAP simulation software // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», филиал в г. Смоленске. Смоленск, 2020. С. 39–44.

20. Madjidov A. Sh. Effect of voltage failure on the operation of auxiliary devices // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12–13 марта 2020). М., 2020. С. 1103.

---

**МАДЖИДОВ АБДУЛЛО ШАРИФХУДЖАЕВИЧ** – аспирант кафедры электрических станций, Московский энергетический институт, Россия, Москва ([MajidovAS@mpei.ru](mailto:MajidovAS@mpei.ru)).

**ГУСЕВ ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций, Московский энергетический институт, Россия, Москва ([GusevYP@mpei.ru](mailto:GusevYP@mpei.ru)).

---

Abdullo Sh. MAJIDOV, Yury P. GUSEV

## METHOD OF ASYNCHRONOUS ENGINES EQUIVALENCY FOR CALCULATING SHORT CIRCUIT CURRENT IN A SYSTEM OF BALANCE-OF-PLANT NEEDS

**Key words:** *equivalency, asynchronous motor, balance-of-plant needs, short circuit, differential equations system, simulation, ETAP program.*

*In short-circuiting in power plants of balance-of-power plant needs three-phase asynchronous motors with a short-closed rotor have a significant influence on the nature of the process and the magnitude of the short circuit current. In the system of balance-of-plant needs it is necessary to take into account the components of short circuit current from asynchronous motors when selecting and checking switches, as well as when selecting and checking current-carrying parts (cables, complete current wires, etc.) not only at the initial moment of the short circuit, but at the time of its shutdown as well. The methods for calculating short circuit current taking into account the influence of asynchronous motors continue to be improved; there is a search for new methods that simplify calculations as much as possible while maintaining the credibility of the results. In doing so, some issues require further study and research, such as the possibility of asynchronous motors equivalency. Power plants have to take into account the components of the short circuit current from a large number of asynchronous engines, which is not only time-consuming, but sometimes impossible due to the absence of full information on engines and mechanisms of balance-of-plant needs. To improve the efficiency and accuracy of calculations for power plant design tasks, it is advisable to replace asynchronous engine groups with equivalents. The relevance of improving the method of equivalency of asynchronous engines at power plants increases along with increasing requirements to enhance the reliability of electrical installations of balance-of-power plant needs and to reduce the costs of technical inventory due to calculation errors. The article considers the method for equivalencing the group of low-voltage asynchronous motors on the example of the balance-of-plant needs system at TPP № 1 located in the town of Dushanbe of the Republic of Tajikistan. Modeling the electromechanical processes caused by short circuits of different electrical remoteness was carried out using ETAP software complex (OTI, USA).*

### References

1. Georgiadi V.Kh. *Povedenie energoblokov TES pri pereryvakh elektrosnabzheniya sobstvennykh nuзд (chasti 1–3)* [Behavior of TPP power units during power supply interruptions for their own needs (part 1–3)]. Moscow, Energoprogress Publ., 2003, 250 p.
2. Zhukov V.V. *Korotkie zamykaniya v elektroustanovkakh napryazheniem do 1 kV* [Short-circuits in electrical installations up to 1 kV]. Moscow, MPEI Publ., 2004, 192 p.
3. Zhukov V.V., Kryuchkov I.P., Neklepaev B.N. *Sravnitel'nyi analiz metodov rascheta tokov KZ v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniem do 1 kV* [Comparative analysis of methods for calculating short-circuit currents in AC electrical installations with a voltage of up to 1 kV]. *Elektricheskie stantsii*, 1996, no. 36, pp. 41–51.
4. Zhukov V.V. *Ekvivalentirovanie asinkhronnykh dvigatelei sistemy sobstvennykh nuзд energobloka* [Equivalence of asynchronous motors of the power unit's own needs system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Ministerstva vysshego i srednego spetsial'nogo obrazovaniya SSSR*. Energetika Publ., 1978, no. 3, pp. 13–18.
5. *Informatsiya za 2020 goda OAO «Dushanbinskaya TETs № 1»* [Information for 2020 of JSC «Dushanbinskaya CHPP no. 1»]. Available at: <http://www.barqitajik.tj/about/dependents/generation/256/196292/> (Accessed: 30 May 2020).
6. Larin A.M., Naumov O.E. *Matematicheskoe modelirovanie mnogomashinnykh sistem s asinkhronnymi dvigatelyami chastotnym metodom* [Mathematical modeling of multi-machine systems with asynchronous motors using the frequency method]. Available at: <http://uchebilka.ru/matematika/155060/index.html>. (Accessed: 30 May 2020).
7. Madzhidov A.Sh. *Uravneniya asinkhronnogo elektrodvigatelya pri perekhodnom protsesse* [Equations of an asynchronous electric motor in a transient process]. In: *Informatsionnye Tekhnologii, Energetika i Ekonomika (elektroenergetika, elektrotehnika i teploenergetika, matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v proizvodstve): sb. tr. XVII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. Studentov i aspirantov* [Proc. of the 17<sup>th</sup> Int. Sci. and Tech. Conf. of Students and Postgraduates «Information Technologies, Energy and Economics (electric power, electrical engineering and heat engineering, mathematical modeling and information technologies in production)»]. Smolensk, 2020, pp. 44–49.

8. Madzhidov A.Sh. *Prakticheskii raschet toka korotkogo zamykaniya s uchetoм vliyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelyei* [Practical calculation of short-circuit current considering the influence of asynchronous motors]. In: *Informatsionnye Tekhnologii, Energetika i Ekonomika (elektroenergetika, elektrotehnika i teploenergetika, matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v proizvodstve): sb. tr. XVII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. Studentov i aspirantov* [Proc. of the 17<sup>th</sup> Int. Sci. and Tech. Conf. of Students and Postgraduates «Information Technologies, Energy and Economics (electric power, electrical engineering and heat engineering, mathematical modeling and information technologies in production)»]. Smolensk, 2020, pp. 34–38.

9. Madzhidov A.Sh., Gusev Yu.P. *Ekvivalentirovanie agregatov sobstvennykh nuzhd elektrostantsii* [Equivalence of units for own needs of power plants]. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov i aspirantov (12–13 mart)* [Proc. of Int. Sci. and Tech. Conf. of students and postgraduates «Radio electronics, electrical engineering and power engineering» (March 12–13)]. Moscow, 2020, p. 1049.

10. Medzhakhed A., Zhukov, V.V. *Ekvivalentirovanie asinkhronnoi nagruzki* [Asynchronous load equivalence]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Ministerstva vysshego i srednego spetsial'nogo obrazovaniya SSSR. Energetika Publ.*, 1990, no. 5, pp. 44–49.

11. Okolovich M.N., Polevaya I.V. *Uchet vliyaniya asinkhronnykh dvigatelei pri raschete tokov korotkogo zamykaniya v sisteme sobstvennykh nuzhd elektrostantsii* [Considering the influence of asynchronous motors when calculating short-circuit currents in the system of own needs of power plants]. *Elektricheskie stantsii*, 1963, no. 4, pp. 54–60.

12. Okolovich M.N. *Proektirovanie elektricheskikh stantsii: uchebnik dlya vuzov* [Design of power stations: textbook for universities]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 400 p.

13. *Opisanie programmy ETAR* [Description of the ETAR program]. Available at: <https://etap.com> (Accessed: 30 May 2020).

14. Rogozin G.G., Larin A.M. *Raschet parametrov ekvivalentnykh rotornykh konturov sinkhronnykh mashin po ikh eksperimental'nykh chastotnym kharakteristikam* [Calculation of parameters of equivalent rotary circuits of synchronous machines based on their experimental frequency characteristics]. *Elektrichestvo*, 1974, no. 6, pp. 10–13.

15. Rogozin G.G., Lapshina N.S., Pyatlina N.G. *Ekvivalentirovanie grupp asinkhronnykh dvigatelei dlya rascheta perekhodnykh protsessov* [Equivalence of asynchronous motor groups for transient calculation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika Publ.*, 1975, no. 1, pp. 87–93.

16. Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K. *Perekhodnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya sobstvennykh nuzhd elektrostantsii: uchebnoe posobie* [Transients in power supply systems for own needs of power plants: tutorial]. Donetsk, 2002, 136 p.

17. Sivokobylenko V.F., Pavlyukov V.A. *Metod ekvivalentirovaniya i rascheta korotkogo zamykaniya v sisteme asinkhronnykh mashin* [Method of equivalence and calculation of short circuit in the system of asynchronous machines]. *Elektrichestvo*, 1979, no. 1, pp. 45–50.

18. Sivokobylenko V.F., Kostenko V.I. *Matematicheskoe modelirovanie AD sobstvennykh nuzhd stantsii* [Mathematical modeling of AD own needs of stations: tutorial]. Donetsk, 1979, 110 p.

19. Madzhidov A. Analysis of short circuit current calculation in auxiliary means of thermal power plants using ETAP simulation software. In: Proc. of the 17<sup>th</sup> Int. Sci. and Tech. Conf. of Students and Postgraduates «Information Technologies, Energy and Economics (electric power, electrical engineering and heat engineering, mathematical modeling and information technologies in production)»]. Smolensk, 2020, pp. 39–44.

20. Majidov A. Effect of voltage failure on the operation of auxiliary devices. Proc. of Int. Sci. and Tech. Conf. of Students and Postgraduates «Radio electronics, electrical engineering and power engineering» (March 12–13). Moscow, 2020, p. 1103.

---

**ABDULLO Sh. MAJIDOV – Post-Graduate Student of Electric Power Stations Department, Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow (MajidovAS@mpei.ru).**

**YURY P. GUSEV – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Stations Department, Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow (GusevYP@mpei.ru).**

---

**Формат цитирования:** *Маджидов А.Ш., Гусев Ю.П. Метод эквивалентирования асинхронных двигателей для расчетов тока короткого замыкания в системе собственных нужд // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 102–115. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-102-115.*