

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИ ПРОВАЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю. Н. Смыков^{1,a}, Е. Ю. Кислицин^{2,b}, М. Н. Иванов^{1,c}

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ✉ sws1007@mail.ru, ^b kislitcin_eu@surgu.ru, ^c nsawt_ese@mail.ru

Аннотация: цель настоящей работы — определение степени влияния кондуктивной электромагнитной помехи (ЭМП) по провалу напряжения на повышение качества функционирования систем электроснабжения. Управление процессами энергосистемы осуществляется на основе учета степени влияния кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения. Особое внимание уделено автономным системам электроснабжения в связи с высокой вероятностью возникновения данной помехи и значительной степенью влияния. Приведена классификация влияния кондуктивной ЭМП по провалу напряжения исходя из динамической устойчивости асинхронных электродвигателей различной установленной мощности. Рассчитаны и приведены графики зависимости времени кондуктивной ЭМП по провалу напряжения как критерия нарушения динамической устойчивости асинхронных электродвигателей различной мощности. Кондуктивная ЭМП по провалу напряжения имеет, как правило, определенную из статистических данных вероятность возникновения, при этом оценка степени влияния помехи на установленное электрооборудование остается актуальной. В данной работе заложены основы анализа необходимости применения помехоподавляющих средств и мероприятий в части рассматриваемой ЭМП, в том числе применение характеристики защиты «время — остаточное напряжение».

Ключевые слова: кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха, электромагнитная совместимость, системы электроснабжения, помехоподавляющие технические средства.

Для цитирования: Смыков Ю. Н., Кислицин Е. Ю., Иванов М. Н. Управление процессами системы электроснабжения силовых электроприемников при провале напряжения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):61–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.

Поступила в редакцию: 23.11.2023.

В окончательном варианте: 10.03.2024.

MANAGING POWER SUPPLY TO ELECTRICAL LOADS VOLTAGE DIP CONDITIONS

Yu. N. Smykov^{1,a}, E. Yu. Kislitsin^{2,b}, M. N. Ivanov^{1,c}

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ✉ sws1007@mail.ru, ^b kislitcin_eu@surgu.ru, ^c nsawt_ese@mail.ru

Abstract: this study aims to establish a methodology for evaluating the impact of conductive electromagnetic disturbances (EMDs) on voltage dips and their effect on the quality of power supply systems. Special focus is given to standalone power supply systems, which are particularly susceptible to such disturbances due to their higher occurrence rates and significant impact. The research presents a classification for the effects of conductive EMDs on the dynamic stability of asynchronous electric motors, categorized by their power ratings. It includes diagrams illustrating the relationship between the duration of conductive EMDs and voltage dips on the dynamic stability of asynchronous motors of various powers. The probability of conductive EMDs causing voltage dips is usually derived from statistical data. However, evaluating the extent of their impact on installed electrical equipment remains a critical issue. This paper establishes a foundational analysis of the necessity of implementing disturbance mitigation strategies and measures against the considered EMDs. It specifically explores the time vs. residual voltage relationship.

Keywords: conductive low-frequency electromagnetic disturbance, electromagnetic compatibility, electricity system, technical means for disturbance suppression.

Cite this article: Smykov Yu. N., Kislitsin E. Yu., Ivanov M. N. Managing Power Supply to Electrical Loads Voltage Dip Conditions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):61–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.

Original article submitted: 23.11.2023.

Revision submitted: 10.03.2024.

Введение

Энергообеспечение — сложная долгосрочная задача с большим количеством значимых факторов. К данным факторам относится повышение качества функционирования систем электроснабжения в условиях сложной электромагнитной обстановки (ЭМО).

На территории России, в условиях удаленного расположения от централизованной энергосистемы, получили широкое распространение автономные системы генерации. В целях оптимальной загрузки и экономической целесообразности на данных энергообъектах мощность подключаемого электрооборудования часто соразмерна с генерируемой. Таким образом, вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения становится выше, например, за счет резкого изменения тока потребления при подключениях. При этом электрическая система в каждом режиме и при переходе от одного режима к другому рассматривается как кибернетическая система, так как имеет характерные признаки:

- наличие цели или алгоритма управления;
- взаимодействия элементов системы с внешней средой, являющейся источником случайных возмущений (толчки нагрузки у потребителей, систематические и несистематические ее изменения, случайные колебания напряжения, атмосферные помехи на линиях передач);
- необходимость отыскания условий оптимальности действия системы;
- управление процессами системы на основе сбора, передачи, приема информации и ее последующей обработки;
- регулирование процессов на основе принципов обратной связи.

Нормы показателей качества электроэнергии в электрических сетях, согласно требованиям ГОСТ 32144-2013, в части указанной помехи [1] характеризуются следующими показателями:

1. Провал напряжения δU_{Π} — ниже 90%.
2. Длительность провала напряжения Δt_{Π} — до 1 мин.

В общем случае в результате провала напряжения (вплоть до нулевого значения) в питающей системе возникает дефицит электроэнергии, величина которого зависит от длительности и глубины провала напряжения. Указанный дефицит энергии появляется непосредственно в агрегатах и механизмах самого технологического процесса. Для описания этого явления можно ввести параметр «энергия провала», которая определяется как объем недополученной энергии за время нарушения работы [2].

Появление данного вида помех имеет различную природу, а именно:

1. Возникновение коротких замыканий.
2. Срабатывание коммутационной и защитной аппаратуры.
3. Действие АПВ.
4. Некорректные схемные решения.
5. Плановые и внеплановые переключения.
6. Подключение электропривода большой мощности.
7. Дефекты электрооборудования и средств автоматики.

При этом в зависимости от структуры системы, разветвленности, генерируемой мощности и т. д. влияние указанной помехи существенно различается. Так, например, общей характеристикой автономных систем электроснабжения является сравнительная близость расположения генераторов к потребителям, или энерго-территориальный охват, поэтому при возникновении данной помехи на все элементы энергосистемы оказывается воздействие ЭМП по провалу напряжения. А именно: происходит снижение момента вращения двигателей, вплоть до остановки электропривода; снижение уровня освещенности, сбой в работе электрооборудования, нарушения цикла работы программируемых логических контроллеров (ПЛК); не корректная работа средств автоматики, снижение КПД электрических машин и т. д. В совокупности возникновение данных помех наносит существенный экономический ущерб. Провалы напряжения длительностью 20–50 мс могут приводить к ущербу в десятки и даже сотни миллионов рублей за одно нарушение [3].

Большое внимание проблеме повышения показателей качества ЭМП по провалу напряжения уделяют и за рубежом. Это вызвано, в том числе, экономическими соображениями. Так, по 25 странам Европейского союза общие потери составляют более 150 млрд евро ежегодно (в 2005–2007 гг.) [4].

Материалы и методы

Согласно [4, 5] положениям национальных нормативно-правовых актов Швеции, предусмотрено разделение ответственности между потребителями и электросетевой компанией в зависимости от класса напряжения питающей сети в соответствии с таблицей 1, где выделяются три области: область I соответствует некритическим провалам напряжения, помехоустойчивость ТС обеспечивается за счет надлежащего их выбора потребителем; область II соответствует критическим провалам напряжения, которые электросетевая компания должна ограничивать исходя из соображений технико-экономической целесообразности; область III соответствует недопустимым критическим провалам напряжения.

Таблица 1

Классификация провалов напряжения в электрических сетях Швеции по признаку разделения ответственности между электросетевыми компаниями и потребителями, для сетей напряжением до 45 кВ включительно

$U_{ocm} \%$	Длительность провала напряжения Δt_{np} , с				
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$	$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$	$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$
$90 > U_{ocm} > 85$	I				
$85 > U_{ocm} > 70$					
$70 > U_{ocm} > 40$			II		
$40 > U_{ocm} > 10$					
$10 > U_{ocm} > 0$					III

Исходя из указанных выше предпосылок и широкой практики применения в автономных системах электроснабжения газопоршневых электростанций (ГПЭС), которые обладают меньшей динамической и статической устойчивостью по сравнению с дизель-генераторными установками, вопросы обеспечения высоких показателей качества в части кондуктивной ЭМП по провалу напряжения являются актуальными. Степень влияния данной помехи с учетом индивидуальных энергетических и технических показателей установленного оборудования, наряду с вероятностью возникновения помехи, являются базовыми факторами разработки технических мероприятий и помехоподавляющих средств. Ввиду повсеместного применения асинхронного электродвигателя, наибольший интерес представляет выявление границы восприимчивости данной электрической машины к ЭМП по провалу напряжения с целью повышения качества функционирования автономной системы электроснабжения.

При номинальном напряжении значение максимальной мощности превышает номинальную мощность практически вдвое. С уменьшением напряжения в питающей сети значение опрокидывающего момента (максимальной мощности) резко снижается (см. рис. 1).

Максимальный момент прямо пропорционален квадрату напряжения [6]:

$$M_{\max} = \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot \omega_c \cdot C_1 \cdot (x_1 + C_1 x_2')}, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов, m_1 — количество фаз питающего напряжения, ω_c — угловая скорость поля, x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора, x_2' — приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

$$C_1 = \frac{r_1 \cdot r_{12} + x_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 \cdot x_{12}^2}. \quad (2)$$

В двигателях общего назначения $C_1 \approx 1,02 \div 1,06$.

При уменьшении напряжения потребляемая реактивная мощность нагрузки снижается. Однако при больших снижениях напряжения реактивная мощность увеличивается из-за останова не отключившихся от сети асинхронных двигателей. При отключении двигателя с заторможенным ротором

возникают значительные перенапряжения до $5U_{\phi}$, так как при работе двигателя в его индуктивности рассеивается магнитная энергия [7].

$$W_M = \frac{L_s}{2} \cdot i_{cp}^2, \quad (3)$$

где L_s — индуктивность рассеивания двигателя, i_{cp} — ток среза.

Поскольку электродвигатель под воздействием тормозного момента механизма и значительного снижения вращающего момента будет снижать частоту вращения, при этом возможно появление (при значительном снижении скорости вращения) отрицательного избыточного момента. В результате при окончании провала напряжения возможно «опрокидывание», или нарушение динамической устойчивости асинхронного электродвигателя.

Следует отметить, что при снижении частоты вращения изменяется индуктивное сопротивление обмотки ротора, а значит, коэффициент мощности данной машины снижается, происходит увеличение тока статора, что, в свою очередь, вызывает повышенное падение напряжения на элементах сети и снижение питающего напряжения на выводах электрической машины.

За основу исследования принимаем, что кондуктивную низкочастотную ЭМП по провалу напряжения, согласно нормативным документам, подразделяют на 6 групп, исходя из длительности данной помехи, и 5 подгрупп, исходя из глубины провала напряжения. Проведем классификацию влияний на динамическую устойчивость асинхронного электродвигателя, включающую в себя показатели по длительности и глубине провала напряжения в соответствии с указанными в нормативных документах (ГОСТ 32144-2013).

Оценка условий динамической устойчивости асинхронного электродвигателя при помощи уравнения динамического равновесия асинхронной машины [8]:

$$T_j \frac{dn}{dt} = \frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}} \cdot \frac{dn}{dt} = m_{\partial} - m_m, \quad (4)$$

$$T_j = \frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}}, \quad (5)$$

где $G \cdot D_{\Sigma}^2$ — суммарный маховый момент электропривода, кг·м²; $P_{ном}$ — номинальная мощность электродвигателя, МВт; n_c — синхронная частота вращения двигателя, о. е.; m_{∂} — вращающий момент двигателя, о. е.; m_m — тормозной момент механизма, о. е.

Затормаживание электродвигателя разнородно и происходит в зависимости от ряда индивидуальных особенностей и характеристик механизма. В первую очередь, это момент инерции, тип механизма, например, компрессор или центробежный насос, коэффициент полезного действия и т. д.

Для центробежных механизмов тормозной момент пропорционален квадрату скорости вращения, обозначен красной кривой на рисунке 1, поэтому данный электропривод имеет более высокую динамическую устойчивость.

На рисунке 1 оранжевой прямой соответствует нагрузка, которая не зависит от частоты вращения, I — обозначена механическая характеристика, соответствующая окончанию действия кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения ($U > 0,9U_{ном}$), II — механическая характеристика, соответствующая работе электродвигателя при сниженном напряжении, III — механическая характеристика, соответствующая работе электродвигателя при значительном снижении напряжения питания, причем $M_{\partial} < M_{мех}$ (M_{∂} — вращающий момент, развиваемый электродвигателем, $M_{мех}$ — тормозной момент, создаваемый механизмом).

Как видно из рисунка 1, при значительном провале напряжения и критической длительности провала скорость вращения снизится до значения n_2 , а это скорость вращения электродвигателя, после снижения которой электродвигатель не сохраняет динамическую устойчивость (возникает отрицательный момент ΔM).

Исходя из наиболее негативного сценария, принимаем тормозной момент механизма постоянным и равным 1 о. е. (оранжевая линия на рисунке 1), а провал напряжения — симметричным.

$$\frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}} \cdot \frac{dn}{dt} = m'_{\partial} - 1, \quad (6)$$

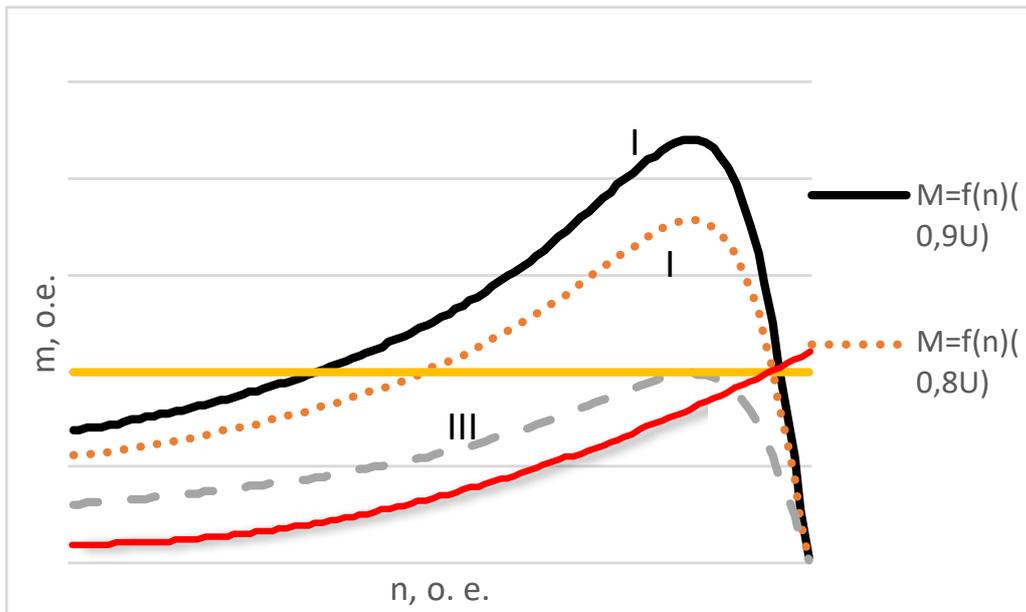


Рис. 1. Влияние кондуктивной ЭМП по провалу напряжения на механическую характеристику асинхронного электродвигателя

где m'_0 — вращающий момент двигателя с учетом снижения напряжения питания, см. рисунок 1.

Используя справочные данные, таблицу 2 и формулу 6, определяем время критическое, после которого происходит опрокидывание асинхронной машины. Полученные данные обозначены как: уст. — обладает динамической устойчивостью в условиях конкретизированной кондуктивной ЭМП по провалу напряжения; не уст. — не обладает динамической устойчивостью в условиях конкретизированной кондуктивной ЭМП по провалу напряжения.

Таблица 2

Справочные данные

№	Тип двигателя	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	η	$\cos \varphi$	$X_m, о. е.$	$R_1, о. е.$	$X_1, о. е.$	$T_j, рад$
1	4A100S2Y3	380	4,0	0,86	0,88	2,5	0,046	0,058	60
2	4A100L2E3	380	5,5	0,87	0,91	3,0	0,050	0,054	80
3	4A132M2Y3	380	11,0	0,88	0,90	3,8	0,040	0,061	90
4	4A160M2Y3	380	18,5	0,88	0,92	4,0	0,049	0,092	90
5	4A180M2Y3	380	30,0	0,90	0,90	3,8	0,030	0,073	110
6	4A225M2Y3	380	55,0	0,91	0,90	4,4	0,026	0,092	150
7	4A250S2Y3	380	75,0	0,91	0,89	4,6	0,021	0,080	150
8	4A250M2Y3	380	90,0	0,92	0,90	4,2	0,020	0,078	150

С целью обеспечения наглядности процессов данные по ряду электродвигателей от 4 до 90 кВт сведены и представлены на рисунке 2.

На основе полученных данных, а также практического опыта эксплуатации электрооборудования и средств автоматики, представляет высокий технико-экономический интерес применение защиты «время — остаточное напряжение» с динамической уставкой по времени срабатывания. Рассмотрим на примере модернизации защиты от обрыва фазы и пониженного напряжения при электроснабжении судов от береговых источников питания. Так как заранее не известны характерные особенности электрических сетей в части качества электрической энергии в различных портах, то вопрос обеспечения автоматического изменения уставки, в том числе по времени провала напряжения, позволит произво-

Таблица 3

Классификация влияния на динамическую устойчивость электропривода с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 5,5 кВт

$U_{ост} \%$	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_{np} , с							
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$		$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$		$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$
$90 > U_{ост} > 85$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$85 > U_{ост} > 70$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$70 > U_{ост} > 40$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,15с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$40 > U_{ост} > 10$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,15с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,13с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$10 > U_{ост} > 5$	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,13с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.

Таблица 4

Классификация влияния на динамическую устойчивость электропривода с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 90 кВт

$U_{ост} \%$	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_{np} , с							
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$		$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$		$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$
$90 > U_{ост} > 85$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$85 > U_{ост} > 70$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$70 > U_{ост} > 40$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	уст. $U_{ост} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$40 > U_{ост} > 10$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ост} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$10 > U_{ост} > 5$	уст. $U_{ост} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ост} = 5$ $t_{кр} = 0,24с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.

дить переключение с одного источника электрической энергии на другой с минимальными технологическими и экономическими издержками.

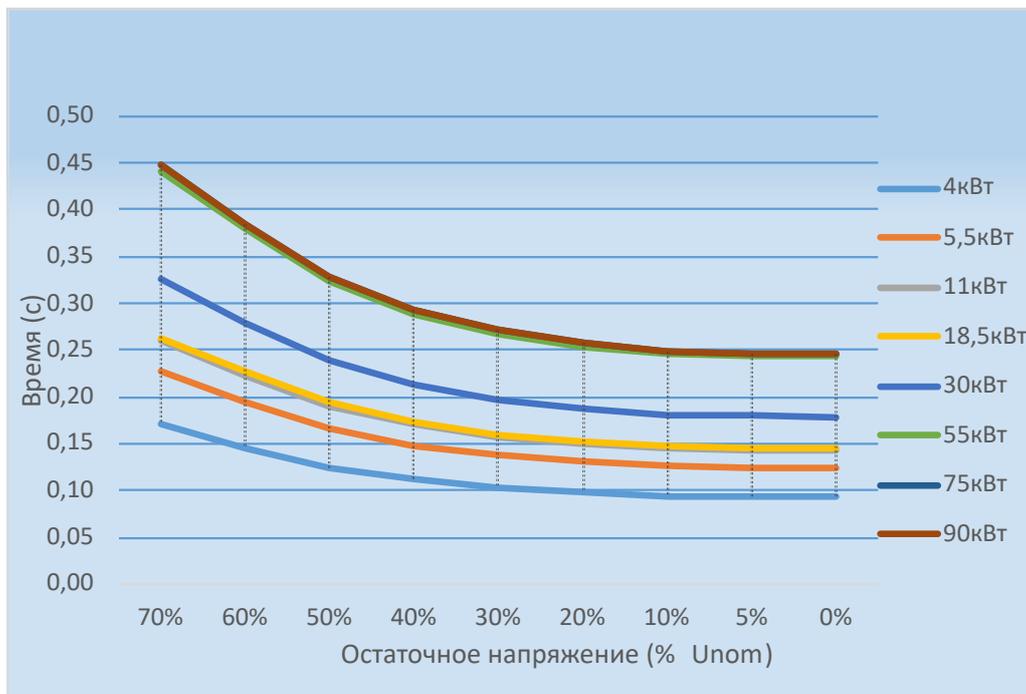


Рис. 2. Определение времени кондуктивной ЭМП по провалу напряжения как критерия нарушения динамической устойчивости асинхронного электродвигателя
Примечание: составлено авторами

При этом уставку по времени отключения судовой электроэнергетической системы от берегового электроснабжения при возникновении кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения необходимо автоматически изменять в зависимости от ряда факторов:

- коэффициент загрузки судовых электроприводов (определение коэффициента загрузки в зависимости от разницы коэффициента мощности, типового для данного проекта, и текущего коэффициента мощности);
- несимметрия напряжения, чем больше значение несимметрии напряжения питания, тем меньше уставка по времени отключения при возникновении провала напряжения;
- коэффициент мощности;
- уровень провала напряжения;
- время с момента предыдущего провала;
- математическое ожидание провала напряжения;
- вероятность возникновения провала напряжения.

Результаты и их обсуждение

В условиях вероятностного возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения данная классификация позволяет выявить востребованность технических мероприятий и средств по подавлению указанной помехи. Прослеживается взаимосвязь с иностранными источниками, а именно, классификация провалов напряжения в электрических сетях Швеции по признаку разделения ответственности между электросетевыми компаниями и потребителями, для сетей напряжением до 45 кВ включительно (см. табл. 1). Полученные данные позволяют обеспечить технико-экономическое обоснование, проектирование и применение мероприятий и средств подавления кондуктивной ЭМП по провалу напряжения, например, «система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [9], что, в свою очередь, значительно снизит издержки, вызванные нарушениями технологического процесса, хранения и обработки данных, повысит надежность и качество функционирования электрооборудования и средств автоматики. Результаты работы послужили основой для обоснования и создания характеристики защиты «время – остаточное напряжение» с использованием динамической уставки по времени срабатывания. С целью обеспечения физической основы указанной защиты, полученные математические расчеты заложены в алгоритм работы программы программируемого логиче-

ского контроллера ПЛК 110-24.30.P-M (фирма-производитель «Овен»). Программа выполнена в среде разработки CoDeSys Version 2.3.9.41 на языке непрерывных функциональных схем CFC. Полученная программа органически вливается и дополняет сценарии использования **Smart Grid** («интеллектуальные сети электроснабжения»), позволяет расширить спектр решаемых задач и обеспечить высокие показатели энергоэффективности и энергосбережения.

Заключение

Оценка электромагнитной обстановки и повышение электромагнитной совместимости технических средств в части указанной помехи ведут к повышению срока службы электрооборудования и качества функционирования системы электроснабжения в целом. С другой стороны, оценка степени влияния кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения является основой для формирования принципов работы защиты от обрыва фазы и провала напряжения, с учетом характеристики «время – остаточное напряжение». Указанная характеристика, в свою очередь, позволяет обеспечить автоматическое изменение уставки (динамическую уставку) при переходе с одного источника питания на другой в условиях возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения. При этом для обоснования перехода с одного источника питания на другой учитывается остаточное напряжение и дополнительные факторы, такие как: несимметрия, коэффициент мощности и другие (указаны выше).

Дальнейшие исследования направлены на уточненный анализ влияния дополнительных факторов на характеристику защиты «время – остаточное напряжение».

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. *Стандартинформ*. 2014;1:10–14.
2. Низамов И. И., Васильев Ю. А., Матухин В. Л. Общие условия влияния провалов напряжения на работу промышленных потребителей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2011;9:183–185.
3. Ершов С. В., Пигалов М. С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017;12(1):95–104.
4. Солодовников В. Е., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. Методика обработки статистической информации о провалах и кратковременных прерываниях напряжения в электрических сетях. *Электричество*. 2019;1(4):4–16.
5. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. *Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168*. Режим доступа: <https://cired.net/publications/cired2011>.
6. Копылов И. П. *Электрические машины*. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат; 1986. 360 с.
7. Шидловский А. К., Пивняк Г. Г. Электромагнитная совместимость потребителей. *Машиностроение*. 2012;2:183–192.
8. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. *Устойчивость энергосистем*. Монография. Кн. 1. СПб.: Издательство НОУ «Центр подготовки кадров энергетики»; 2006. 369 с.
9. Переладов М. Е., Смыков Ю. Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 2022;1. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47784413_27547585.PDF.